

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro **s. Tomáše M E R T L Í K A**obor **strojírenská technologie**

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ
a textilní
LIBEREC 1, STUD.
FSC 461 17

Protože jste splnil ... požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnice ministerstva školství a kultury o státních závěrečných zkouškách tento diplomový úkol:

Název tématu: Studium souvislostí mezi statickými a dynamickými
vlastnostmi šedých litin

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou výroby odlitků hlav válců a bloků válců ve slévárně np. LIAZ Liberec. Zaměřte se zejména na technologii formování, odlévání a příp. tepelného zpracování odlitků.
2. Seznamte se s výsledky došavadních prací v tomto oboru a ve spolupráci s vedoucím DP a konzultanty navrhnete vhodnou metodiku dokončení provedených měření, jejich vyhodnocení netradičními způsoby a navrhnete též zpřesněnou metodiku pro pokračování zkoušek.
3. Proveďte grafické zhodnocení všech dostupných měření, příp. s použitím dostupné výpočetní techniky při zpracování, a pokuste se formulovat souvislosti mezi charakterem struktury jednotlivých vzorků, mechanickými vlastnostmi statickými i dynamickými, zejména s ohledem na hodnoty a změny modelu pružnosti v tahu.
4. Naměřené výsledky zpracujte přehledně ve vzájemných vazbách, definujte tyto vazby a navrhnete zjednodušený způsob tahové zkoušky s přesným měřením pomocí které by bylo možno přesněji charakterizovat výsledné dynamické vlastnosti šedé litiny, zejména v odlitku.

Autorské právo za text zůstává u MŠK pro státní
zkušební úkolový úkol. 11. 11. 1977. JCT 9/2 ze dne
12. listopadu 1977. Na základě příkazu č. 24 ze dne
21. 8. 1968 § 18 a. s. 1. vydání zákona č. 115/53 Sb.

Rozsah grafických laboratorních prací: tabulky ,grafy

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran

Seznam odborné literatury:

JAKEŠ J. : Diplomová práce- 1975

SKALA P.: Diplomová práce 1975

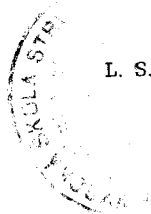
- Výsledky řešení oborového úkolu OC 551 v n.p. LIAZ.

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. V. Chaloupecký, CSc

Konsultanti: Ing. František Groh
Ing. Jaroslav Exner, CSc (LIAZ)

Datum zahájení diplomové práce: 10.10.1977

Datum odevzdání diplomové práce: 26.5.1978



L. S.

V. Chaloupecký
Doc. Ing. V. Chaloupecký, CSc

Vedoucí katedry

B. Stríž
Doc. RNDr. B. Stríž, CSc

Děkan

v Liberci

dne

7.10.1977

19

" Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury."

V Liberci dne 26.5.1978

VŠST L I B E R E C

Fakulta strojní

Obor 23 - 07 - 8

Strojírenská technologie

zaměření strojírenské metalurgie

Katedra technologie a nauky o materiálu

STUDIUM SOVISLOSTÍ MEZI STATICKÝMI A DYNAMICKÝMI

VLASTNOSTMI ŠEDÝCH LITIN

M E R T L Í K Tomáš

DP - ST. 1349/78

Vedoucí práce : Doc. Ing. Věclav Chaloupecký CSc /KTM VŠST/

Konzultant : Ing. František Groh /KTM VŠST/

Ing. Jaroslav Exner CSc /LIAZ slév. Liberec/

Rozsah práce a příloh	:	79
Počet stran	:	78
Počet příloh a tabulek	:	1+5
Počet obrázků	:	52
Počet výkresů	:	-
Počet modelů nebo jiných příloh	:	-

DT. "669.131.6,004.12:539.40121

26.5.1978

O b s a h

	str.
1. Úvod	1
2. Krystalizace šedé litiny	5
2.1 Krystalizace podoctetických litin	5
2.2 Krystalizace eutektických litin	6
2.3 Vliv přísad na krystalizaci šedé litiny	6
2.4 Strukturní součásti šedé litiny	8
2.5 Šedá litina s lupínkovým grafitem	10
2.6 Vliv složení na strukturu a vlastnosti šedé litiny	12
2.7 Vztahy mezi strukturou, složením a vlastnostmi	13
3. Mechanické vlastnosti šedé litiny	16
3.1 Vlastnosti šedé litiny s lupínkovým grafitem	16
3.2 Mechanismus deformace šedé litiny	18
3.3 Únavová pevnost šedé litiny	22
4. Experimentální část	26
4.1 Získání výchozích údajů	26
4.2 Vyhodnocení struktury	26
4.3 Vyhodnocení tahových diagramů	48
4.4 Zjištění únavové pevnosti	54
4.5 Vyhodnocení závislosti modulu pružnosti na napětí	61
5. Diskuse výsledků	73
6. Závěr	77
Seznam použité literatury	78

Seznam použitých zkratk a symbolů

σ	-	pevnost
σ_{Pt}	-	mez pevnosti v tahu
σ_c	-	mez únavy
σ_I	-	mez mikroplastických deformací
σ_{Ptn}	-	mez pevnosti, vypočtená z chemického složení
ϵ	-	deformace
ϵ_{tN}	-	deformace při N-tém cyklu
ϵ_{t1}	-	deformace při 1. cyklu
ϵ_t	-	deformace v okamžiku lomu
ϵ_{tFr}	-	přetvárná schopnost v okamžiku lomu
C_{ekv}	-	uhlíkový ekvivalent
S_c	-	stupeň eutektičnosti
d	-	konstanta $1,03 \cdot 10^{-5}$
E	-	modul v pružnosti v tahu
HB	-	tvrdost podle Brinella
RC	-	stupeň zralosti
RH	-	relativní tvrdost
HBn	-	tvrdost vypočtená z pevnosti v tahu
MPa	-	megapascal
Δl	-	element délky
l_o	-	měřená délka
β_t	-	konstanta
N_{Fr}	-	počet cyklů do lomu
β_t	-	konstanta
N	-	počet cyklů
DL	-	délka dendritů

1. Úvod :

Slitiny s větším obsahem uhlíku než 2 % tvoří významnou skupinu surových želez a litin. Litiny se na rozdíl od surových želez vyrábějí přetavováním ve vhodných slévárenských pecích - kuplovnách. Jejich hlavním představitel je především šedá litina, ve které je uhlík vyloučen ve tvaru lupínkového grafitu, který dodává lomu světle šedou, někdy až tmavě šedou barvu. Odtud také její název.

Šedá litina spojuje přednosti nízké ceny, dobré slévateľnosti a výhodných mechanických vlastností. Lze z ní odlévat součástky velmi rozdílných a složitých tvarů o hmotnosti několika dkg až několika set tun, délky několika mm až 15 m a tloušťce stěny až do několika set mm. Tyto a další důvody byly příčinou značného rozšíření šedé litiny jako konstrukčního materiálu, k čemuž nemalou měrou přispěl i příznivý vývoj pevnostních a technologických vlastností šedé litiny v posledních letech.

Výroba odlitků představuje u nás asi 20 % celkové hmotnosti strojírenské výroby, z toho na odlitky ze šedé litiny připadá asi 74 %. Zbytek tvoří ostatní odlitky, ať už z temperované litiny / asi 2 % / a oceli / zhruba asi 24 % /. S touto skladbou však nemůžeme být spokojeni, protože s porovnáním s celosvětovou produkcí znatelně pokulháváme. V průmyslově vyspělých státech ať už v SSSR nebo v USA se odlitky ze šedé litiny uplatňují v daleko větší míře./ až 82 % odlitků ze šedé litiny a 6 % odlitků z temperované litiny a dálece menší měrou odlitky z oceli /.

Tato skutečnost je dána jednak širokým použitím temperované litiny v seriové výrobě vozidel a hospodářských strojů a hlavně uplatněním litiny tam, kde se u nás používá dražší oceli. Proto by zvětšení podílu odlitků ze šedé litiny a temperované litiny měla být do budoucna jedna ze základních otázek strojírenské výroby.

Litina jako konstrukční materiál se velkou měrou uplatňuje také v automobilovém průmyslu. Výrobků ze šedé litiny je právě v tomto odvětví průmyslové výroby značné množství, ať už jde o odlitky bloků, hlav válců, brzdových bubnů a podobně.

V automobilovém průmyslu ČSSR se v současné době vyrábí zhruba 40.000 nákladních automobilů ať už pro dopravu osob a nebo stále rostoucí potřebu přepravy materiálu.

Výrobky našeho automobilového průmyslu nejsou určeny pouze pro náš vnitřní trh, ale stále větší % výroby jde na vývoz, zejména do zemí RVHP. V šesté pětiletce a dalších letech se počítá se zvýšením počtu vyráběných vozů až o 100 % a současně s výraznou inovací výrobků, která má být v souladu se světovým vývojem.

Protože podíl odlitků ze šedé litiny na váze nákladních automobilů je značný a ovlivňuje celkovou ekonomii provozu vozidel, je nutno věnovat těmto odlitům velkou pozornost.

Lze tedy bez nadsázky tvrdit, že slévárny automobilového průmyslu soustřeďují a přednostně uplatňují pokrokové moderní metody slévárenské technologie a významně tím ovlivňují vývoj celého slévárenského oboru.

Se zaváděním nových pokrokových metod výroby odlitků ze šedé litiny a současně se zvyšováním výkonu motoru bez dalšího významnějšího zvětšení váhy však vplynuly nové, dosud neznámé problémy.

Z dnešního pohledu je patrné, že dřívější odlitky byly poměrně hmotné a zároveň tedy více méně předimenzované. Novější konstrukce, hlavně přechod od nepřepřehňovaných motorů k přeplňovaným, u kterých je možno bez významného zvětšení váhy zvýšení výkonu až o 30 - 100 %, však

přináší kromě již zmíněného zvýšení výkonu i dosud neznámé problémy. Ukazuje se totiž, že s postupným zvětšováním stupně přeplnění bude nutno dosavadní konstrukce motorů a dalších odlitků ze šedé litiny nejen konstrukčně upravovat, ale i řešit nové konstrukčně technologické koncepce a nebo přejít na jiný druh materiálu, na příklad na nízkolegovanou šedou litinu s vyšší pevností, nebo na litinu tvárnou.

Podíváme-li se na současný stav znalostí vlastností šedé litiny, zejména vlastností dynamických, zjistíme, že nemáme k dispozici mnoho dobrých hodnot, ze kterých bychom mohli vycházet a nebo hodnot, kterých by bylo možno použít jako hodnot srovnávacích pro vyhodnocení experimentálně zjištěných cyklických napětí.

I když se toto tvrzení může zdát poněkud přehnané, že neznáme vlastnosti klasického slévárenského materiálu, jakým je šedá litina, musíme si uvědomit, že ještě v nedávné době se docela vážně tvrdilo, že z pohledu dynamického zatěžování nejsou šedé litiny citlivé k vrubovým účinkům a přitom by se dala uvést řada konkrétních případů, kdy toto tvrzení je zcela evidentně neplatné.

Pro studium samotných statických vlastností v závislosti na struktuře je, pravda, k dispozici dost objektivních údajů, kterých lze použít, avšak jak již bylo řečeno, toto vůbec neplatí v případě, kdy odlitek má být zatěžován cyklicky proměnnými silami. Ze těchto okolností poznáme, že přes veškeré úsilí a provedené zkoušky ať už u nás nebo v zahraničí, nám pro přímou aplikaci chybí alespoň základní údaje o chování tenkostěnných litinových odlitků při různém dynamickém zatížení. Nejsou k dispozici znalosti o vlivu struktury v tenkých stěnách na výslednou mez únavy hlavně v tahové oblasti, dále není možno objektivně vyhodnotit vliv rovnoměrně a jemně vyloučeného grafitu a grafitu přechlazeného při zatěžování statickém a dynamickém. /1/

Některé z navozených problémů a navržení cesty k jejich řešení je tematem této diplomové práce, která je součástí technického rozvoje ve slévárně LIAZ Liberec.

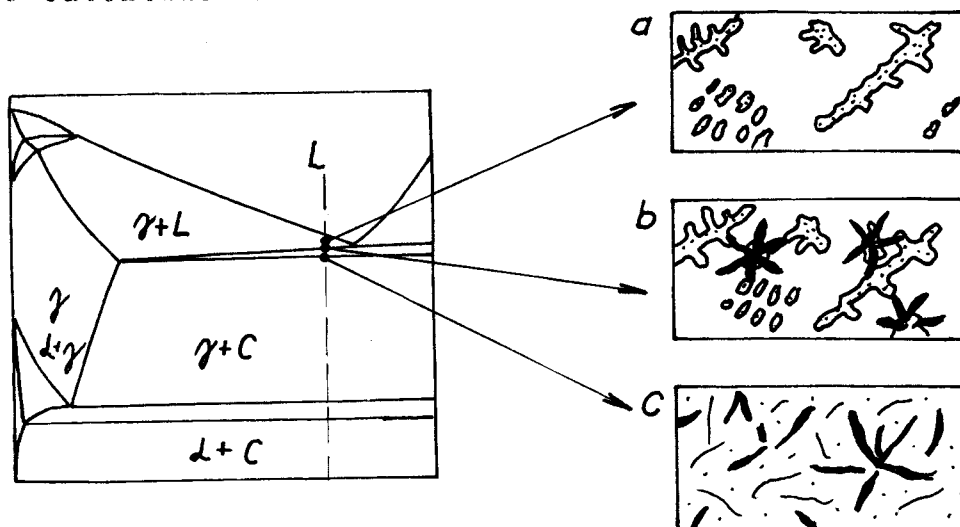
Jejím úkolem je hlubší poznání zákonitostí chování šedé litiny při zatížení ať už statickém nebo dynamickém a vyhodnocení všech dostupných měření, dále zkoumání zákonitostí mezi strukturou šedé litiny a jejími mechanickými vlastnostmi s ohledem na hodnoty a změny modulu pružnosti v tahu. Zjištěné výsledky jsou zpracovány ať už ústně neb graficky v následující zprávě.

2. Krystalizace šedé litiny

Obsah uhlíku v šedé litině při výrobě klasickým způsobem, t.j. v kuplovnách, nepřekračuje hodnotu 2,5 - 3,6 %. Snížení obsahu uhlíku pod 2,5 % je z provozních důvodů velmi obtížné a naopak obsah nad 3,6 % je méně vhodný, protože pak tyto litiny mají většinou horší mechanické vlastnosti. S ohledem na chemické složení je možno litiny považovat ze slitiny podeutektické. až eutektické.

2.1 Krystalizace podeutektických litin

Krystalizace podeutektických litin začíná vylučováním dendritických krystalů austenitu z taveniny, krystaly rostou na úkor taveniny a zároveň taveninu obohacují uhlíkem. Jakmile stoupne obsah uhlíku v kapalně fázi na eutektickou hranici, začíná tavenina tuhnout jako eutektikum. / obr.2.1.1 /



obr.2.1.1 - Scheme krystalizace podeutektické litiny
a/ vznik dendritu austenitu
b/ počátek krystalizace eutektických buněk
c/ konec krystalizace / grafit + austenit /

Při této krystalizaci je určující fází grafit. Jeho zárodky se tvoří buď v tavenině nebo na povrchu již přítomných krystalů austenitu. Grafit rostoucí z těchto zárodků ochuzuje okolní taveninu o uhlík a vytváří tak vhodné podmínky pro krystalizaci a růst austenitových zrn. Grafit spolu s austenitem pak tvoří eutektické buňky, jejichž růst je poměrně rychlý. Lupínky grafitu rostou přednostně do délky a vzniká tak složitý prostorový útvar. Příčný růst grafitových lupínek je brzděn tím, že lupínek je od kapalně fáze izolován krystaly austenitu, kterého obklopují a zabraňují tak přímému styku s taveninou. Počet a velikost eutektických buněk má základní význam pro strukturu a vlastnosti šedé litiny. /2 /

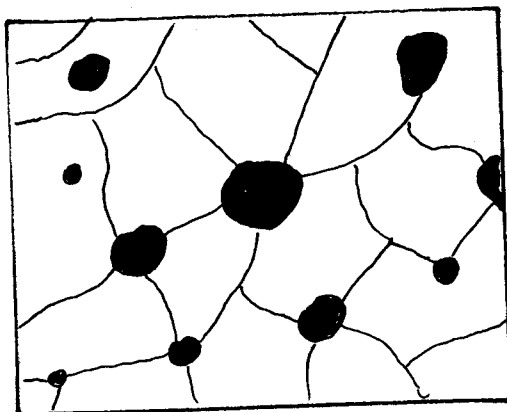
2.2 Krystalizace eutektických litin

Krystalizace eutektických a nadeutektických litin se od popsaného postupu výrazně neliší. Eutektické litiny krystalizují výhradně vytvářením eutektických buněk. Litiny nadeutektické začínají krystalizaci vyloučením uhlíku z přesycené taveniny ve tvaru hrubých, nezdeformovaných lupínek grafitu. Na těchto lupíncích pak krystalizuje grafit eutektický ve tvaru eutektických buněk podle postupu popsaného dříve. Seskupení grafitových útvarů závisí na složení litiny a podmínkách chladnutí. Při pomalém ochlazování a při velkém přehřátí litiny se vytvoří hrubé, málo rozvětvené grafitové lupínky. Při větším přehřátí taveniny a při rychlejším ochlazování vznikají drobné, značně zohýbané lupínky grafitu. /2 /

2.3 Vliv přísad na krystalizaci šedé litiny

Stupeň podchlazení lze značně ovlivnit přidáním malého množství vhodných přísad. Zmenšit ho lze přidáním

malého množství ferrosilicia do dostatečně přehřáté litiny. Tím se zvětší počet eutektických buněk, které vzniknou při krystalizaci a zjemňuje se tím eutektický lupínkový grafit. Naopak přidáním malého množství hořčíku nebo ceru vznikne grafit zcela odlišným způsobem. Místo lupínkového grafitu vznikají zrna. /obr.2.3.1/



obr.2.3.1 - Zrnitý grafit

Každé zrno grafitu se skládá z několika krystalů rostoucích na všechny strany z jednoho zárodku. Vznik tohoto druhu grafitu není ještě zcela jednoznačně vysvětlen, ale nejpravděpodobnější se jeví teorie, podle níž hořčík silně zmenšuje povrchové napětí v základní rovině šesterečné buňky. Tím se umožní přednostní růst zrn ve směru výšky, naproti tomu u neočkovaných litin převládá růst grafitu ve směru základní roviny.

Jako velmi pravděpodobná je i ta teorie, podle níž při krystalizaci grafitu se uplatňuje i vliv kysličníků, popřípadě i jiných sloučenin hořčíku, které vznikají v roz-tavené litině a působí jako umělé zárodky. Při eutektické krystalizaci zrnitého grafitu se vylučuje vznikající austenit na zrnech grafitu a izoluje je tak od ostatní taveniny. Proto růst zrn grafitu pokračuje pomaleji nežli růst zrn lupínků. Vzniká ale větší počet zárodků, z nichž se potom vytvoří zrna.

2.4 Strukturní součásti šedé litiny

Na výbruse šedé litiny je možno zjistit celou řadu různých strukturních složek. Patří sem :

a/ grafit

tvar a množství grafitu má velký vliv na mechanické vlastnosti šedé litiny. Podle ČSN 42 0461 se hodnotí grafit podle tří základních hledisek a to podle tvaru, podle rozložení a podle velikosti. Hodnocení se provádí na neleptaném výbrusu při stonásobném zvětšení. Odstupňování uvedených hledisek je schematicky znázorněno v tabulce 1.

Tabulka 1 - Hodnocení grafitu

Označení	Tvar	Označení	Rozložení	Označení	Velikost / μm /
I	lupínkový	A	rovnoměrné	1	1000
II	pavoučkovitý	B	růžicové	2	500-1000
III	červíčkovitý	C	smíšené	3	250-500
IV	nedokonale zrnitý	D	mezidendritické neusměrněné	4	120-250
V	pravidelně zrnitý	E	mezidendritické usměrněné	5	60-120
				6	30-60
				7	15-30
				8	15

Norma obsahuje ještě metodu B, podle níž se grafit hodnotí podle tvaru, velikosti, rozložení a množství.

V hodnocení tvaru, velikosti a rozložení nejsou mezi metodou A a B zásadní rozdíly, v hodnocení množství je určován poměr plochy zaujímané grafitem k celkové ploše výbrusu / v % /.

b/ perlit

Perlit tvoří základní matici v litině perlitické šedé, tvárné a temperované. Jeho přítomnost se hodnotí podle množství, hustoty a tvaru. Množství kolísá v celém rozsahu 0 - 100 %, tvar bývá podle podmínek eutektoidní reakce lamelární až zrnitý o velikosti od 0,3 μm nad 1 μm . Struktura perlitu udává v podstatě houževnatost a pevnost litiny a její odolnost proti opotřebení.

c/ ferit

Ferit je v litinách v podstatě tuhým roztokem křemíku v železe. Na jedné straně je tím zvětšena pevnost feritu, na druhé straně však klesá jeho tažnost. Litiny s větším množstvím feritu ve struktuře mají menší pevnost v tahu a tvrdost a zároveň i menší odolnost proti opotřebení než litiny s čistě perlitickou strukturou. Obsah feritu se hodnotí podílem plochy feritu k celkové ploše výbrusu / v % /.

Další, ne již tak typickou strukturní součástí, je:

1. cementit

Cementit se objevuje, vzniká-li při krystalizaci litiny ledeburitické eutektikum. Je-li pouze část uhlíku vázána jako cementit, tvoří pak cementit nesouvisející krystaly. Vzniká-li výhradně ledeburitické eutektikum, tvoří cementit ve struktuře souvislou síť. Cementit v litině zhoršuje pevnost a houževnatost, avšak zvyšuje tvrdost a odolnost proti otěru právě díky tomu, že jako interstiční sloučenina je tvrdý a křehký.

2. Fosfit železa - steadit

Steadit je ternární eutektikum s velmi nízkou teplotou tání a proto se při krystalizaci litiny soustřeďuje v posledních podílech kapalně fáze. Protože rozpustnost fosforu v tuhém stavu je v litině velmi malá, objevuje se steadit již při obsahu fosforu nad 0,3 % jako samostatné krystaly nebo při větším obsahu fosforu jako síť po hranicích eutektických buněk. Steadit zhoršuje houževnatost, mez únavy a proto pro dynamicky namáhané odlitky je snaha co nejvíce zamezit přítomnosti steaditu v litině.

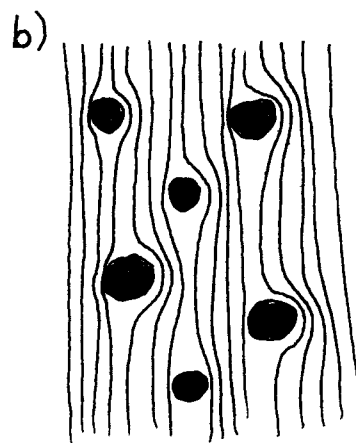
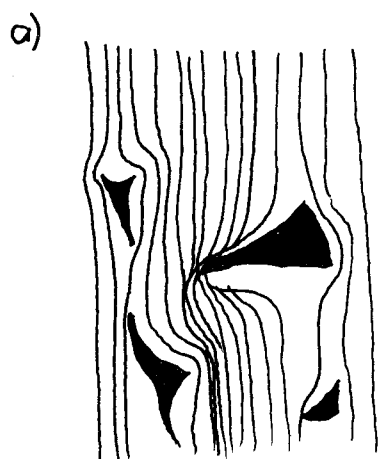
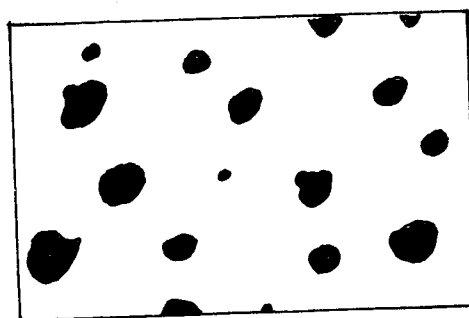
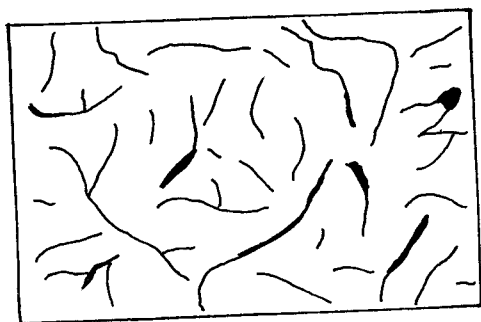
Nakonec se mohou v litině objevit jako strukturní složky i sulfidy a to buď jako sulfid manganatý nebo podvojný sulfid manganato-železnatý /2/

2.5 - Šedá litina s lupínkovým grafitem

Podle normy ČSN 42 1241 se rozlišuje celkem šest jakostí nelegované šedé litiny s lupínkovým grafitem. Rozdíl mezi těmito skupinami je hlavně v rozdílných mechanických vlastnostech. Pevnost v tahu se pohybuje od 100 MPa do min. 350 MPa pro tloušťku odlité tyče \varnothing 30 mm. Litiny s pevností v tahu do 300 MPa patří k běžným druhům, litiny s pevností vyšší se získávají očkovaním ferosiliciem.

Na mechanické vlastnosti šedé litiny má největší vliv tvar, velikost a rozložení grafitu a struktura základní hmoty - matrice. Grafit ovlivňuje pevnost tím, že grafitové lupínky zmenšují aktivní průřez a vyvolávají vznik místních koncentrací napětí při namáhání součástí / obr.2.5.1 /.

Špičky napětí mohou dosáhnout až dvacetinásobku jmenovitého napětí a jsou tím větší, čím menší je poloměr zakřivení lupínku grafitu a čím delší jsou tyto lupínky. Plocha namáhaného průřezu se zmenšuje nejen přítomnými



Obr.2.5.1 - Vliv tvaru a polohy grafitu na silový tok

- a/ šedá litina s lupínkovým grafitem -
koncentrace napětí na koncích grafitových
lupínků
- b/ tvárná litina se zrnitým grafitem

grafitovými lupínky, ale i tím, že lupínky grafitu místně zcela obalí základní matici a tím ji izolují tak, že nemůže přenášet žádné napětí. Lze tedy oprávněně předpokládat, že u litiny s lupínkovým grafitem se efektivně využije zhruba 30 - 50 % skutečné pevnosti matrice a vůbec se neuplatní její plastické vlastnosti. Z téhož důvodu při očkování ferrosiliciem /zjemnění grafitových lupínků/ roste pevnost litiny.

2.6. Vliv složení na strukturu a vlastnosti šedé litiny

Základní strukturu litiny mohou ovlivnit doprovodné a přísadové prvky, jsou-li přítomny v litině ve větším množství. Křemík snižuje teplotu tání litiny, zvyšuje její tekutost a zvětšuje sklon ke tvoření bublin a pórů. Přítomnost křemíku snižuje koncentraci uhlíku v eutektiku a eutektoidu. Výrazně ovlivňuje polohu jednotlivých rovnovážných čar ve stabilním i metastabilním diagramu slitin Fe - C.

Pro posouzení vlivu doprovodných prvků na strukturu litiny byly vypracovány empirické vzorce, podle nichž se zjišťuje uhlíkový ekvivalent C_{ekv} .

$$C_{\text{ekv}} = C + 0,3 (\% \text{ Si} + \% \text{ P}) \quad (2.6.1)$$

Podle hodnoty C_{ekv} ($= 4,3$; $< 4,3$; $> 4,3$) se posuzuje eutektičnost, podeutektičnost a nebo nadeutektičnost litiny. Pro zjištění litiny, jejího složení, se však častěji používá stupeň eutektičnosti S_c .

$$S_c = \frac{C \%}{4,3 - 0,312 (\% \text{ Si}) - 0,275 (\% \text{ P})} \quad (2.6.2)$$

Je-li S_c rovno 1, jde o litinu eutektickou, je-li menší jak 1, o litinu podeutektickou a konečně je-li větší jak 1, jde o litinu nadeutektickou.

Mangan stabilizuje cementit, zvětšuje tekutost litiny a homogenitu odlitku. Odsiřuje litinu, proto ho v ní bývá asi 0,4 - 0,8 %. Větší množství zvětšuje tvrdost a křehkost litiny.

Síra zvyšuje tvrdost, zhoršuje mechanické vlastnosti a způsobuje křehkost litiny. U jakostních litin nemá být větší obsah síry než 0,04 %.

Fosfor zlepšuje tekutost a stabilizuje cementit. Zvětšuje odolnost proti opotřebení, tvrdost, křehkost a zhoršuje odolnost proti dynamickému namáhání. / 2 /

2.7 Vztahy mezi strukturou, složením a vlastnostmi

Jak již bylo řečeno, jsou mechanické vlastnosti značně závislé na struktuře. Proto bylo vztahům mezi strukturou, složením a vlastnostmi v posledních letech věnováno mnoho pozornosti. Z předních badatelů je možno jmenovat A. Collauda, G. Gilberta nebo W. Pattersona, kteří přispěli k objasnění těchto vlivů a umožnili tak bezpečnější odhad vlastnosti litiny v hotovém odlitku.

A. Collaud, který se věnoval vztahům mezi σ_{Pt} ; HB a E. vyjádřil na podkladě experimentálních údajů vztah ;

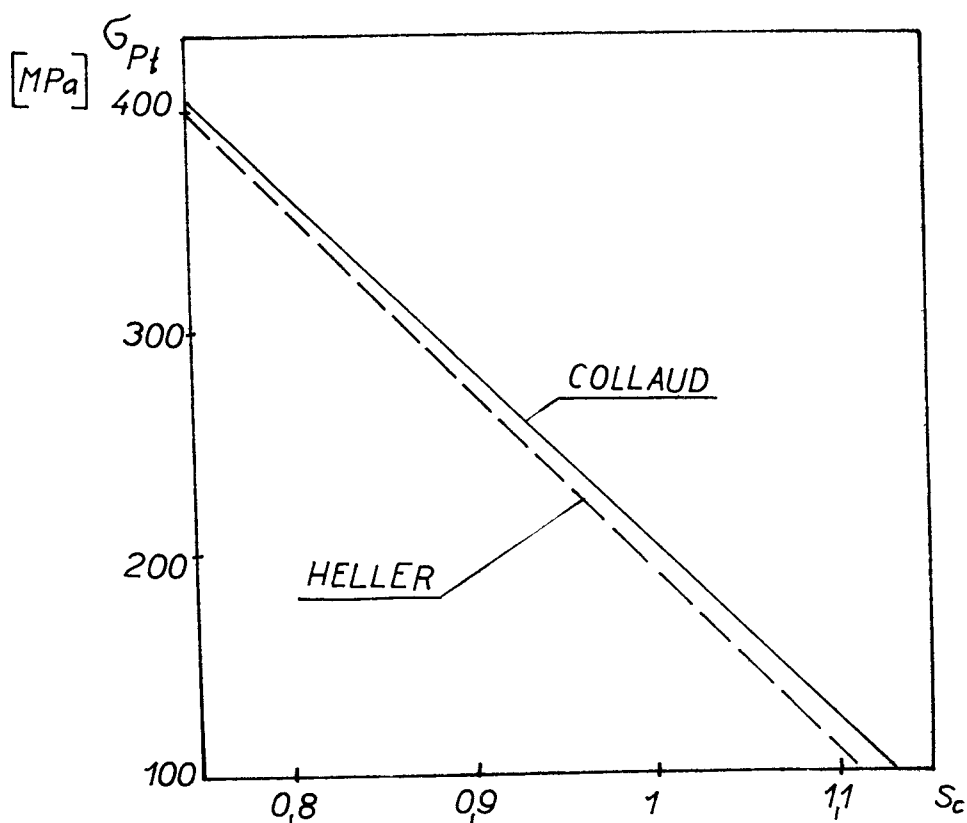
$$\sigma_{Pt} = \lambda \cdot E \cdot HB \quad (2.7.1)$$

kde λ je koeficient $1,03 \cdot 10^{-5}$, který roste se stoupající pevností. Jedním z dalších často používaných vztahů je vztah mezi σ_{Pt} a stupněm eutektičnosti.

$$\sigma_{Pt} = (100,6 - 80 S_c) \cdot 10 \text{ [MPa]} \quad (2.7.2)$$

Grafické znázornění této závislosti je na obrázku / 2.7.1 / zároveň se závislostí dle Hellera a Jungblutha:

$$\sigma_{Pt} = (102 - 82,5 S_c) \cdot 10 \text{ [MPa]} \quad (2.7.3)$$



Obr. 2.7.1 - Závislost σ_{Pt} na stupni eutektičnosti S_c

Pro posouzení jakosti litiny jsou vhodné i vztahy mezi stupněm eutektičnosti S_c a tvrdostí litiny HB dle Collauda:

$$HB = 465 - 270 S_c \quad (2.7.4)$$

Je však nutno říci, že všechny výše uvedené vztahy mají pouze přibližnou platnost, protože plně nezachycují podstatněji vliv tvaru grafitu, který jak bylo řečeno, má na vlastnosti šedé litiny podstatný vliv.

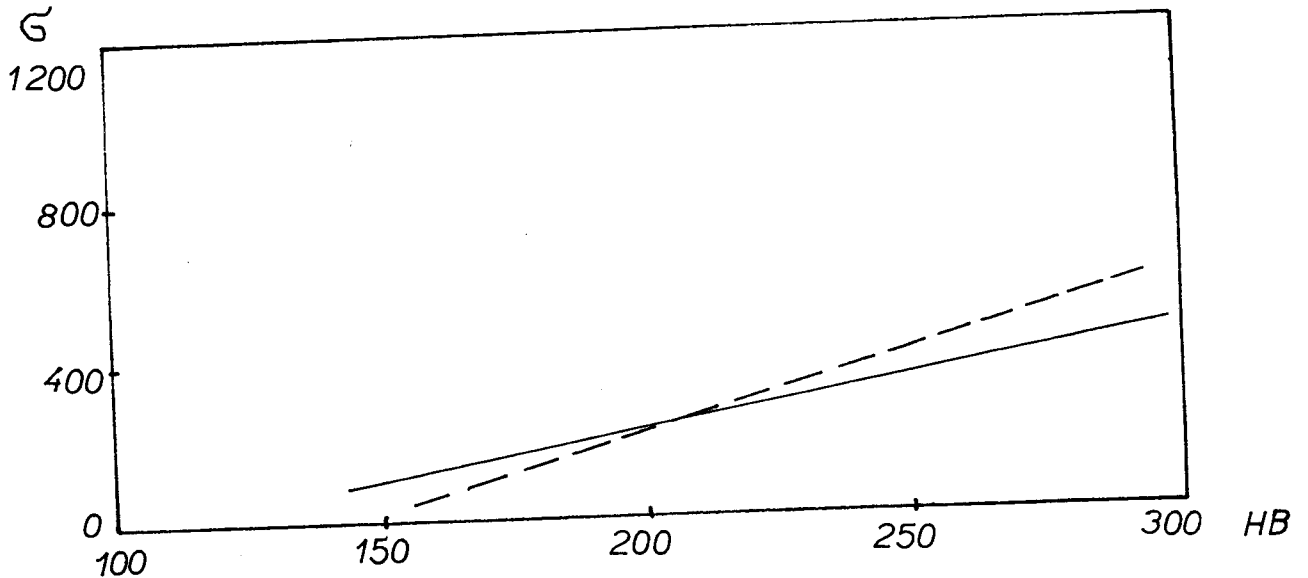
Pro vztahy mezi σ_{Pt} a tvrdostí HB vyjádřil Collaud:

$$HB = 125 + 0,034 \sigma_{Pt} \quad (2.7.5)$$

a Mc.Kenzie vztah:

$$HB = 100 + 0,043 \sigma_{Pt} \quad (2.7.6)$$

Graficky je tato závislost patrna z obrázku / 2.7.2 /



obr.2.7.2 - Vztah mezi pevností a tvrdostí šedé a tvárné litiny
1 - šedá litina (A.Collaud)
2 - tvárná litina (Mc.Kenzie)

Pro hodnocení vlastnosti litiny byl v posledních letech zaveden pojem stupeň zralosti RG, což je poměr σ_{Pt} zjištěné trhací zkouškou a pevnosti σ_{Ptn} , vypočtené z chemického složení a pojem relativní tvrdost RH.

$$RG = \frac{\sigma_{Pt}}{\sigma_{Ptn}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.7.7)$$

kde σ_{Ptn} je vypočtena ze vztahu Heller - Jungbluthova:

$$\sigma_{Ptn} = (102 - 82 \cdot 6 S_c) \cdot 10 \quad [MPa] \quad (2.7.8)$$

Ze vztahů (2.7.7) a (2.7.8) plyne:

$$RG = \frac{\sigma_{Pt}}{(102 - 82 \cdot 6 S_c)} \cdot 10 \quad [\%] \quad (2.7.9)$$

Relativní tvrdost je definována jako poměr naměřené tvrdosti HB k tvrdosti vypočtené z pevnosti v tahu:

$$HB_n = 100 + 0,043 \sigma_{Pt} \quad (2.7.10)$$

a dosezením pak

$$RH = \frac{HB}{100 + 0,043 \sigma_{Pt}} \quad (2.7.11)$$

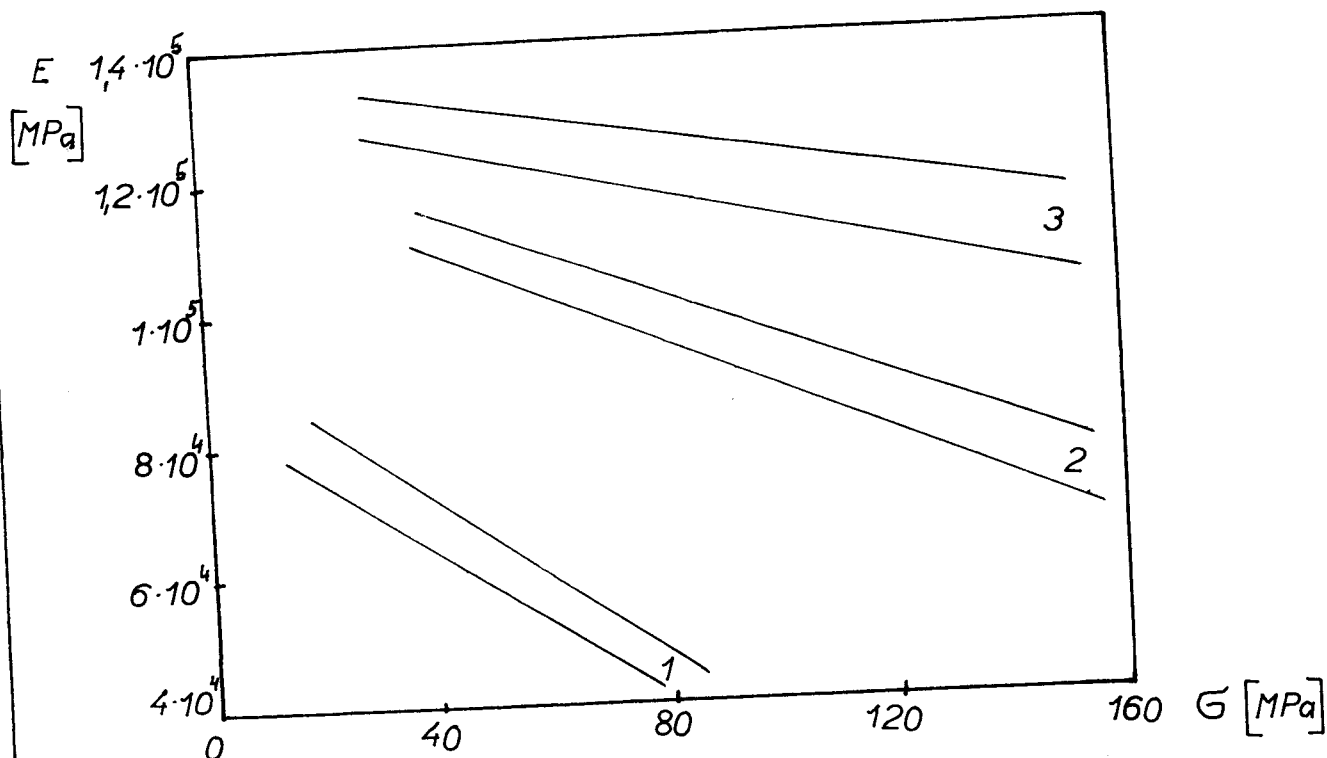
Oba poslední uvedené pojmy zhodnocují metalurgické vlivy při výrobě litiny. Litina je tím jakostnější, čím vyšší je její stupeň zralosti a nižší relativní tvrdost.

Všechny výše uvedené vztahy byly vyšetřovány na zvlášť k tomuto účelu litých tyčích, u nichž je možno zaručit přibližně stejnou rychlost ochlazování. Proto u odlitků, jakými jsou na příklad bloky motorů nákladních automobilů, kde je rychlost ochlazování jednotlivých průřezů rozdílná, bývájí struktura i mechanické vlastnosti odlišné. Na základě tohoto faktu sestrojil A. Collaud diagram, který by vedle tvrdosti, pevnosti v tahu a pružnosti respektoval i vliv rychlosti ochlazování, vyjádřený tloušťkou stěny odlitku. Z něho lze určit pro daný stupeň eutektičnosti a velikost odlitku očekávané mechanické vlastnosti. Diagram není uveden, je ho však možno nalézt v /2/.

3. Mechanické vlastnosti šedé litiny

3.1 Vlastnosti šedé litiny s lupínkovým grafitem

Jednou z výrazných charakteristických vlastností šedé litiny je neplatnost Hookova zákona, tedy změna modulu pružnosti v tahu napětím. Modul pružnosti je ovlivňován množstvím grafitu a pohybuje se poměrně v širokých mezích, t.j. zhruba od $6 \cdot 10^4$ MPa do $1,6 \cdot 10^5$ MPa. Závislost modulu pružnosti na napětí pro šedou litinu o pevnosti v tahu 120, 180, 240 MPa je na obrázku /3.1.1/



obr.3.1.1 - Závislost modulu pružnosti v tahu na napětí pro různé druhy šedé litiny
1/ litina ČSN 42 2410
2/ litina ČSN 42 2420
3/ litina ČSN 42 2425

O poněkud jiném vyhodnocení závislosti E na σ je pojednáno v kapitole 4.6 této práce.

Pevnost v ohybu je u šedé litiny přibližně 2x větší než pevnost v tahu a je zároveň funkcí struktury. Přítomnost grafitu však ovlivňuje pevnost v ohybu dalece méně než pevnost v tahu.

Tvrdość u čistě perlitické litiny je asi 220 HB. S rostoucím množstvím feritu nebo grafitu se tvrdość zmenřuje až na hranici 130 HB u čistě feritické litiny. U bílé litiny zvyšuje přítomnost cementitu tvrdość až do 500 HB./2/

3.2 Mechanismus deformace šedé litiny

Nejjednodušší podmínky pro sledování mechanismu deformace u šedé litiny nastanou při statickém zatěřování, kdy rychlost zatěřování nepřekročí 10MPa/sec a rychlost deformace je zhruba 10^{-3} s^{-1} .

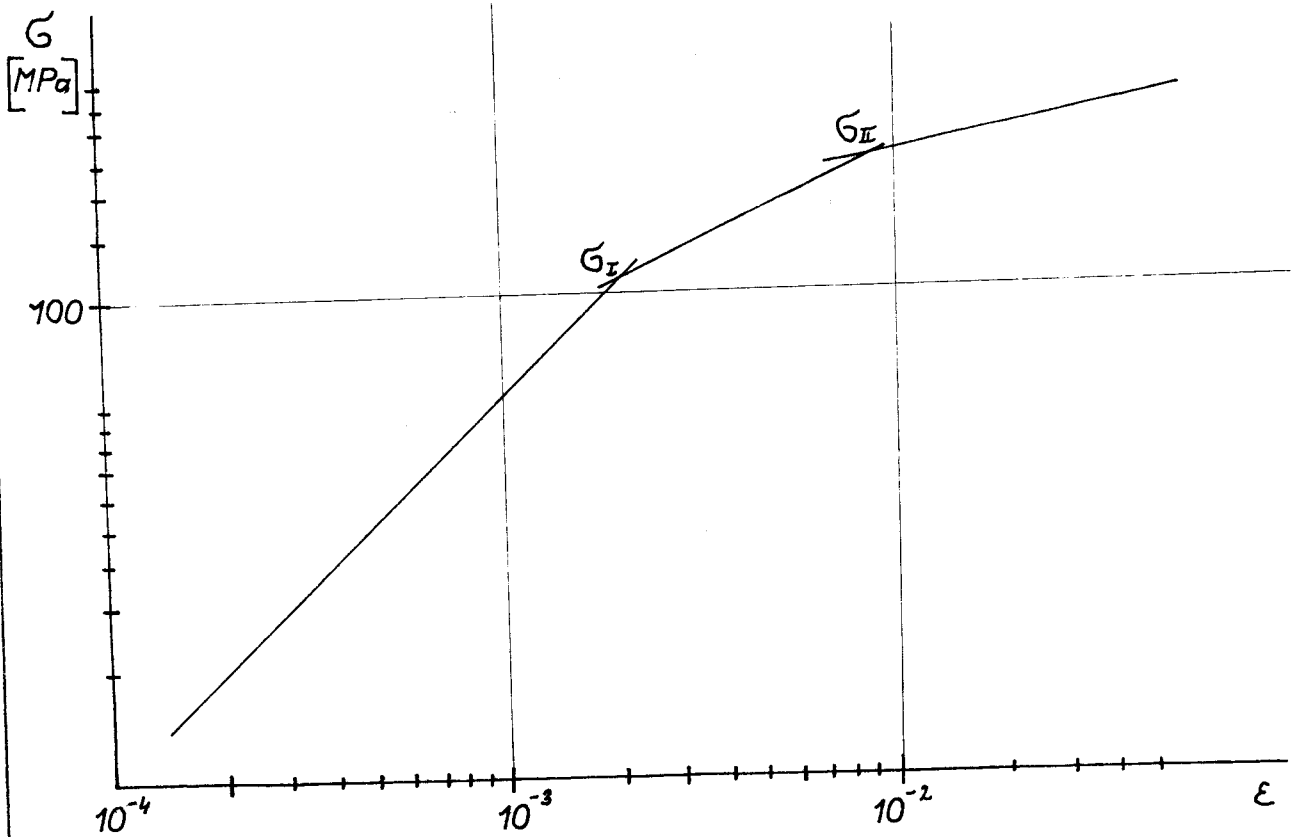
Řadou provedených pokusů a měření se zjistilo, že lze u šedé litiny vyjádřit závislost mezi pevností a deformací vztahem

$$\sigma = E \cdot \epsilon^n \quad (3.2.1)$$

kde E je modul pružnosti v tahu [MPa] a ϵ je deformace, n je konstanta. Rovnice (3.2.1) je vlastně obecnějším vyjádřením Hookova zákona, ve kterém $n = 1$. Zaneseme-li experimentálně zjiřtěné údaje do souřadnic $\lg \sigma$; $\lg \epsilon$ /obr. 3.2.1/ zjistíme, že celkovou deformaci šedé litiny lze rozložit do tří základních oblastí, charakterizovaných hodnotou exponentu n .

První oblast, popsaná směrnici n_I , je oblastí mikroplastických deformací. Hodnota exponentu n_I se pohybuje v rozmezí 0,85 až 1,0. Tuto oblast ohraničuje tzv. mez mikroplastických deformací σ_I . Při opakovaném zatěřování až do hodnoty σ_I nebyly zjiřtěny žádné měřitelné zbytkové deformace.

Druhá oblast, kterou charakterizuje exponent n_{II} , nabývající hodnot 0,4 až 0,7, je již oblastí pružně



obr. 3.2.1 - Vztah mezi σ a ϵ v lg souřadnicích

plastické deformace. Je limitována napětím σ_{II} , o kterém je možno se domnívat, že je napětím potřebným k tomu, aby dislokace při svém pohybu překonaly bariéru, kterou představují lupínky grafitu. Tato oblast je již při konstantním napětí charakterizována malou rychlostí deformace.

Třetí oblast, popsaná směrnici n_{III} , jejíž hodnota se pohybuje v rozmezí 0,18 - 0,4 je rovněž oblastí pružně plastické deformace. Tato oblast je ohraničena lomem zkoušeného vzorku a je v ní již časový rozvoj deformace při konstantním napětí významný.

Výskyt tří rozdílných oblastí deformace je patrně charakteristickou zvláštností šedé litiny, u ostatních litin, ať už temperované nebo tvárné a u oceli byly zjištěny pouze dvě rozdílné oblasti deformace, oblast pružné deformace a pružně - plastické deformace. Pouze u tvárné litiny izotermicky zakalené byly opět zjištěny tři oblasti deformace.

Vlivem exponentu n na deformační zpevnění oceli se zabývali Bergström a Aronsson, avšak použití jejich výkladu na šedou litinu je komplikováno jednak složitým stavem napětí, vyvolaným přítomností částic grafitu v kovové matici, jednak nemálo zanedbatelnými koncentračními gradienty křemíku a dalších prvků, které ovlivňují hustotu dislokací v kovové matici a tím i mechanismus plastické deformace.

V /V/ bylo zjištěno, že při míjivém zatěžování amplitudou napětí vyšší než mez mikroplastických deformací σ_I roste jak celková, tak i residuální deformace. Podle zjištěných údajů lze celkovou deformaci při N -tém cyklu ϵ_{tN} vypočítat z

$$\epsilon_{tN} = \epsilon_{t1} \cdot N^{\Delta t} \quad (3.2.2)$$

kde ϵ_{t1} je celková deformace při prvním cyklu a Δt je exponent, o němž lze při prvním přiblížení předpokládat, že je konstantou.

Při zkouškách šedé litiny stupňovitým zatěžováním bylo zjištěno, že hodnoty celkové deformace šedé litiny v okamžiku lomu jsou poměrně stejné a pohybují se okolo 0,7 %, t.j. $\epsilon_t = 7 \cdot 10^{-3}$. K lomu tělesa dochází v okamžiku vyčerpání přetvárné schopnosti materiálu, který v našem případě dosáhne maxima celkové deformace, t.j. 0,7 % při statickém zatěžování. Při opakovaném zatěžování však závisí přetvárná schopnost litiny v okamžiku lomu ϵ_{tFr} na počtu cyklů do lomu N_{Fr} podle:

$$\epsilon_{tFr} \cdot N_{Fr}^{\beta t} = \epsilon_{t \max} \quad (3.2.3)$$

kde lze předpokládat, že βt je v prvním přiblížení konstantou. Předpokládáme-li, že $\epsilon_{tN} = \epsilon_{tFr}$, dostaneme z (3.2.2) a (3.2.3) vztah

$$\epsilon_{tmax} \cdot N_{Fr}^{-\beta t} = \epsilon_{tl} \cdot N_{Fr}^{\Delta t} \quad (3.2.4)$$

odkud po úpravě vyplyne počet cyklů do lomu.

$$N_{Fr} = \left(\frac{\epsilon_{tmax}}{\epsilon_{tl}} \right)^{- (\Delta t + \beta t)} \quad (3.2.5)$$

Hodnoty ϵ_{tl} a ϵ_{tmax} lze odečíst z diagramu $\sigma - \epsilon$ a hodnotu Δt zjistíme vyhodnocením růstu celkové deformace při míjivém zatěžování konstantní amplitudou napětí. Velmi obtížné je však stanovení β_t , avšak podle provedených měření se ukazuje, že β_t se pohybuje v intervalu 0,04 - 0,01.

Z výsledků pokusů také vyplynulo, že hodnota exponentu n_I se zvětšuje s rostoucím stupněm předchozí pružně plastické deformace. Na podkladě přesných měření vztahu $\sigma - \epsilon$ je možno z hodnoty n_I usuzovat na závažnost předchozího namáhání a na zbytkovou deformační schopnost šedé litiny.

Obecně lze tedy říci, že čím je hodnota n_I větší, tím byla předchozí zatížení větší a zbytková deformační schopnost je menší. K růstu hodnoty exponentu n_I dochází v případě, že napětí překročí hodnotu meze mikroplastických deformací σ_I . Lze si tedy představit, že v tomto případě

překročí maximální napětí v okolí lupínků grafitu mez kluzu a dojde k lokální plastické deformaci. Po odlehčení tělesa se v tomto místě ustaví rovnováha mezi tahovým a tlakovým pnutím. Množství lokalit, jejich velikost a velikost zbytkových pnutí, závisí na způsobu a velikosti zatížení a projeví se na hodnotě exponentu n_1 při následujícím zatížení.

Z výsledků mnoha měření je možno konstatovat, že plastizované oblasti se mohou rozšiřovat jak postupným zvyšováním amplitudy napětí, tak i míjivým zatěžováním konstantní amplitudou napětí větší než σ_I .

3.3 Únavová pevnost šedé litiny

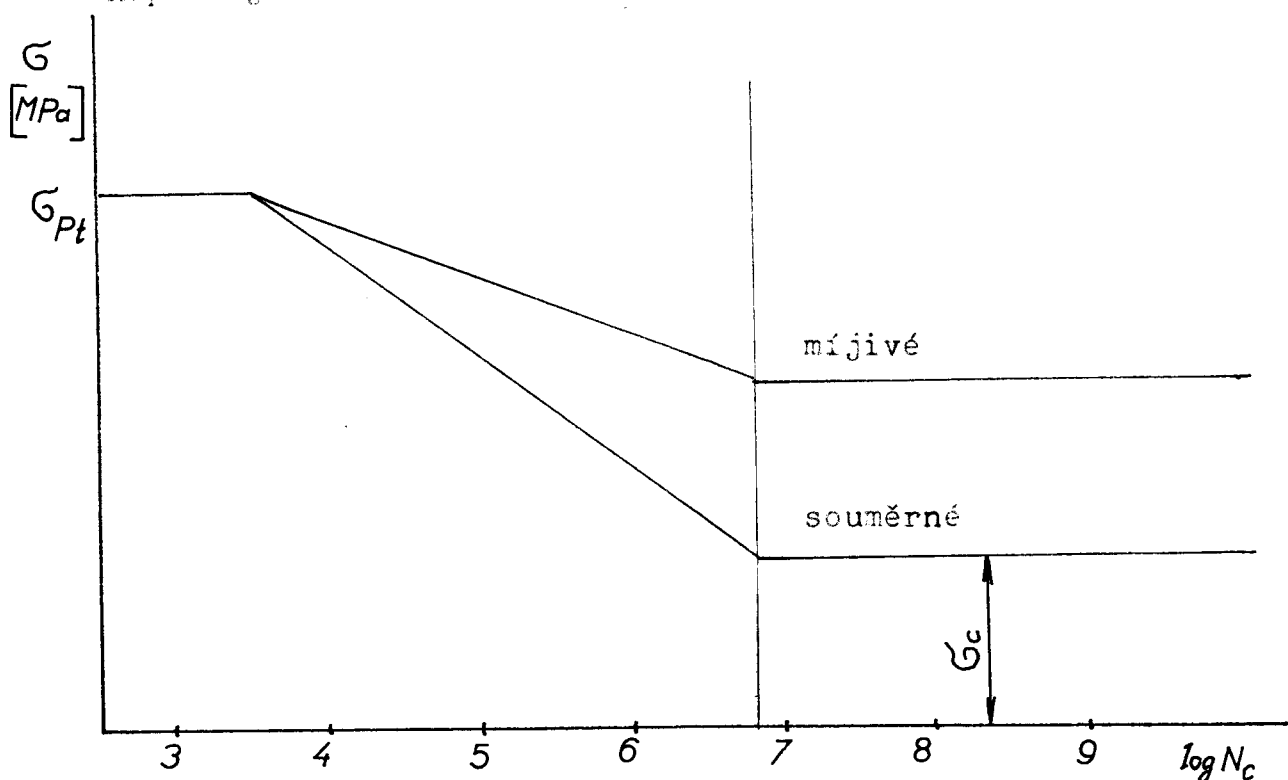
Při hodnocení únavové pevnosti šedé litiny se vychází z tzv. Wöllerovy křivky (dále jen W-křivky), která vyjadřuje vztah mezi napětím a počtem cyklů do lomu v souřadnicích $\sigma - \lg N$. W-křivky jsou vyšetřovány při cyklickém homogenním zatěžování zkušebních těles konstantní amplitudou napětí σ_a . Vyšetřují se pro dvě oblasti a to pro oblast časované pevnosti a únavové pevnosti.

V oblasti časované pevnosti lze vyjádřit W-křivku analyticky podle rovnice, navržené Weibullem:

$$N (\sigma - \sigma_c)^m = k \quad (3.3.1)$$

při čemž σ_c je napěťová konstanta, σ je napětí v šikmé větvi W-křivky a N je uvažovaný počet cyklů, k a m jsou konstanty, kde hodnota konstanty m závisí na druhu namáhání a tvaru namáhaného tělesa.

V oblasti únavové pevnosti je pokles W-křivky v závislosti na počtu cyklů do lomu velmi malý a je možno ho tedy zanedbat, aniž se tím dopustíme nějaké podstatné chyby. Základní W-křivky pro dva nejdůležitější typy zatěžování a to zatěžování souměrné střídavé, jakým je tah - tlak a míjivé zatěžování s konstantní amplitudou napětí jsou na obrázku /3.3.1/

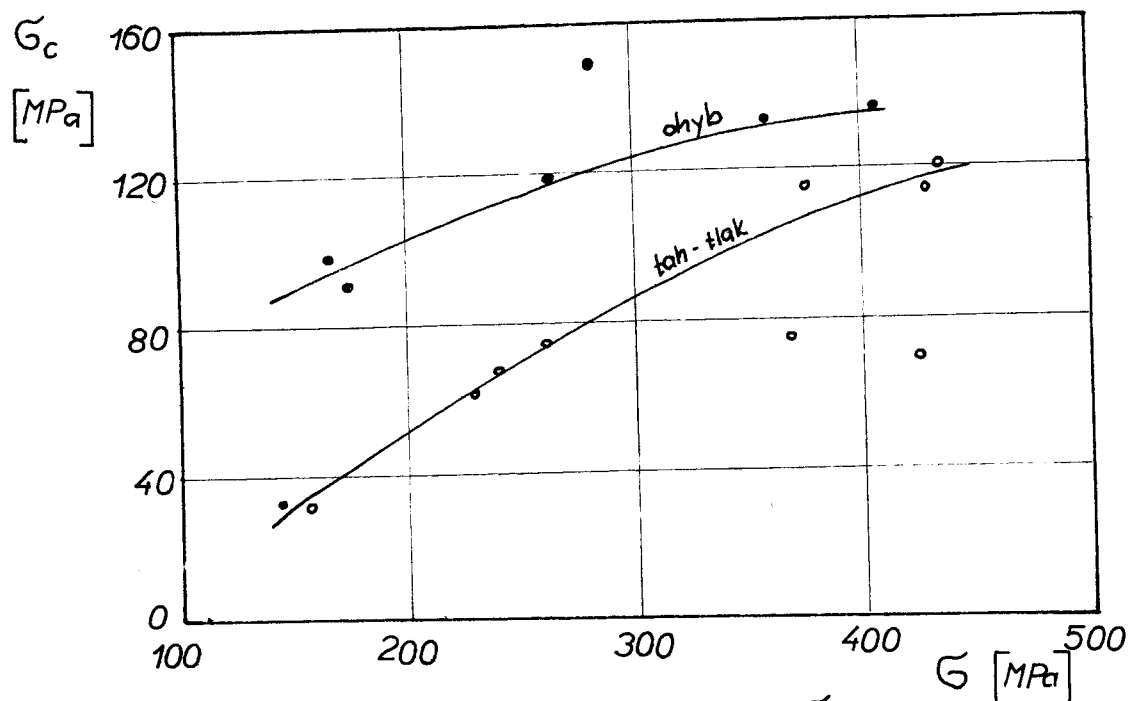


obr. /3.3.1/ Charakteristický tvar W-křivky
a/ míjivé zatěžování
b/ souměrné střídavé

Tyto křivky jsou výchozími podklady pro konstrukci diagramů, umožňujících posoudit mezní stavy pro cyklické namáhání. K zvláštnostem šedé litiny patří i rozdílná pevnost v tlaku oproti pevnosti v tahu. Tento rozdíl zůstává zachován i pokud jde o únavovou pevnost.

Únavová pevnost materiálu značně závisí na druhu namáhání a často bývá vyjadřována graficky v závislosti na pevnosti v tahu příslušného materiálu. Mez únavy šedé

litiny při zatěžování tah - tlak a při střídavém napětí v ohybu je znázorněna podle Pompe a Hempela na obrázku / 3.3.2 /.



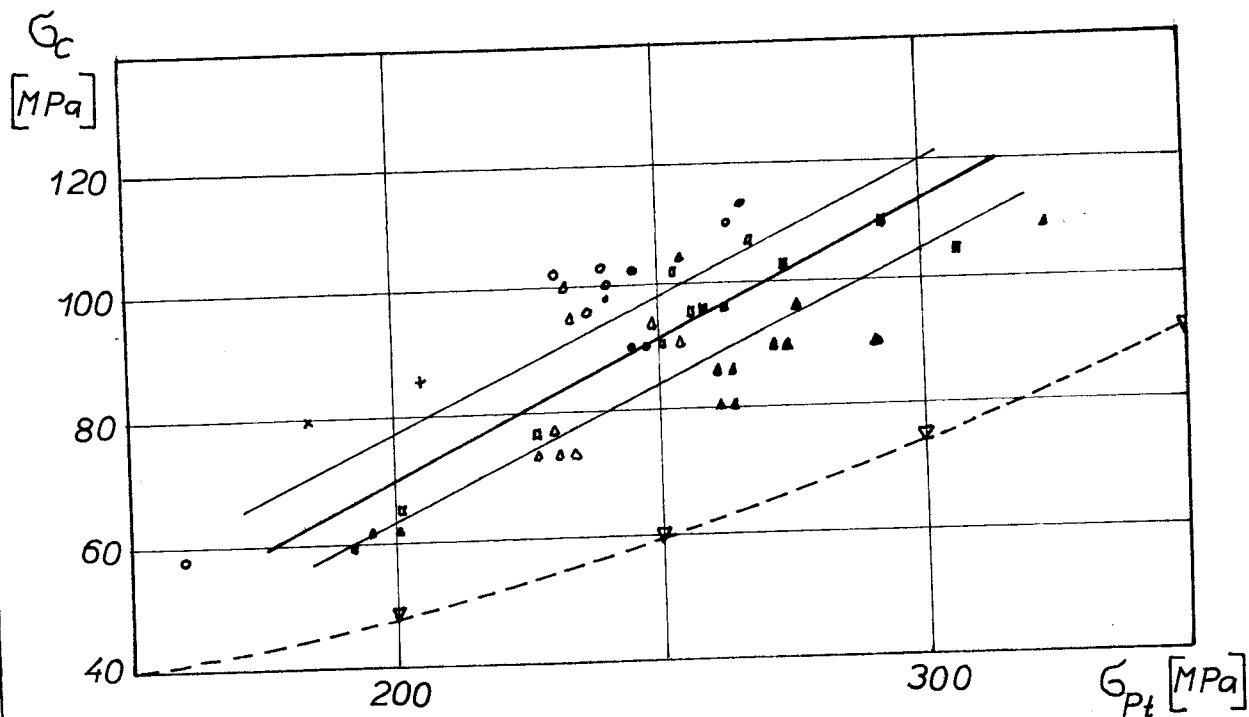
obr. /3.3.2/ - Závislost meze únavy G_c na pevnosti G

Jak je z obrázku vidět, mez únavy v ohybu je vyšší než mez únavy souměrné zatěžování tah - tlak a obě rostou s rostoucí pevností litiny.

Podrobnějším výzkumem vlivu některých činitelů na mez únavy při souměrném zatížení tah - tlak se zabývali Patterson a Lahn. Vedle již známých údajů z literatury připravili i celou řadu údajů z vlastních pokusů. Za nejvýznamnější lze považovat jimi odvozený vztah mezi mezí únavy při střídavém souměrném zatížení tah - tlak a mezi pevností G_{Pt} , obsahem fosforu P, délkou dendritů DL a počtem eutektických buněk Z pro který platí rovnice

$$G_c = - 2,7 + 0,42 G_{Pt} + 2,97 \% P - 0,16 DL - 0,00337Z \quad (3.3.2)$$

Vypočtené hodnoty a šířka rozptylového pásma jsou na obrázku /3.3.3/. Značný počet získaných hodnot však leží mimo rozptylové pásmo.



obr./3.3.3/ - Závislost meze únavy při souměrném zatížení tah - tlak na mezi pevnosti σ_{Pt} .

Z uvedeného přehledu o únavové pevnosti šedé litiny je dobře vidět, že v současné době je již k dispozici poměrně značné množství objektivních údajů pro mez únavy při různém způsobu namáhání. Ukazuje se však, že rozdíly mezi hodnotami meze únavy pro litinu o dané pevnosti mohou dosáhnout až 50 % i více. Proto je nutno si uvědomit, že použití údajů z literatury na řešení konkrétního případu je spojeno se značným stupněm nepřesnosti, který se tím zvyšuje, čím se uvažuje obecnější způsob namáhání. / 3 /

4. Experimentální část

4.1 Získání výchozích údajů

Pro získání vlastních objektivních údajů o mechanických vlastnostech různých taveb šedé litiny byly v n.p. LIAZ odlity zkušební tyče pro řadu zkoušek v šesti různých tavných v obdobi od 29.1.75 do 10.11.1975. Chemické složení tyčí, datum odlití, stupeň eutektičnosti a vyhodnocená měření jsou uvedeny v tabulce II. Zkušební vzorky byly podrobeny statickému zatížení pro získání hodnoty σ_{pt} , zatížení pro získání pevnosti v ohybu, pevnosti v tlaku mezi klíny a pro získání meze únavy byly zkušební tyče podrobeny ohybu za rotace, míjivému tahu a plochému ohybu. Velikosti zkušebních tyčí a způsob jejich namáhání, jakož i výsledné hodnoty, jsou uvedeny rovněž v tabulce II., která je až na menší doplnění převzata z n.p.LIAZ.

Protože v možnostech n.p.LIAZ není provedení všech zkoušek, byly tyto zkoušky zadány VUT Praha a VUT Brno, katedra nauky o materiálu.

Pro další vyhodnocení tedy byly k dispozici diagramy pro tyče ϕ 18 ze stroje ZWICK a pro ploché tyče 3x10 ; 6x10 obrobené a 6x10 neobrobené.

Z každé tavy bylo vybráno několik tyčí, u nichž získané hodnoty slibovaly zajímavé výsledky. Tyto tyče jsou uvedeny v tabulce III.

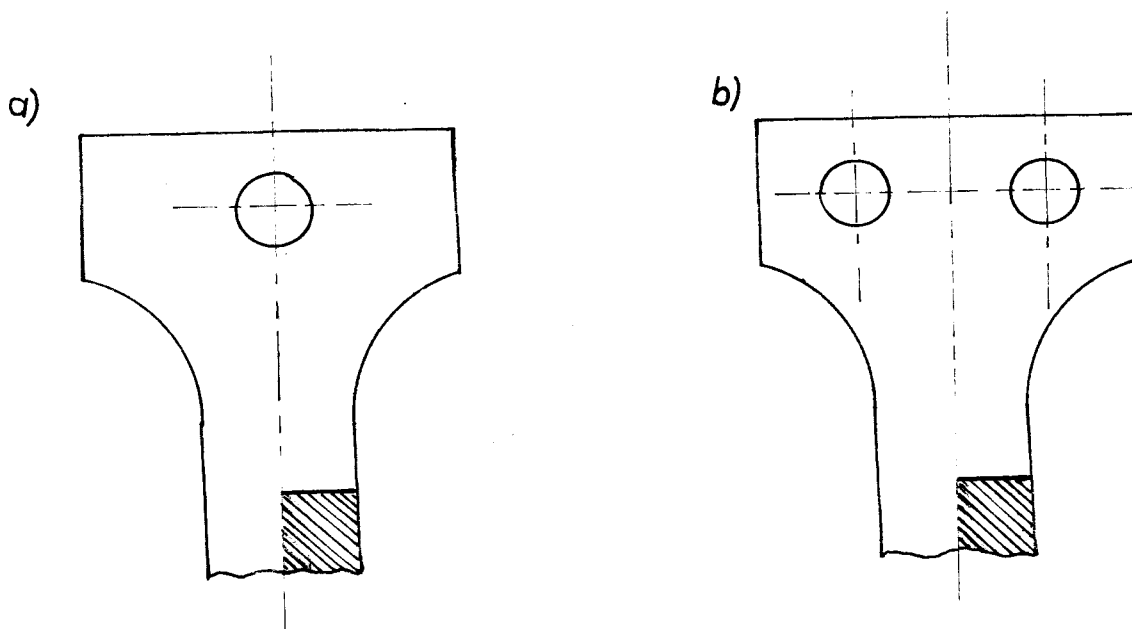
4.2 Vyhodnocení struktury

Ze všech vybraných vzorků byly odebrány v místě lomu vzorky pro vyšetření struktury. Místo odebrání je patrné z obrázku /4.2.1/. Tyče, které přes podrobené zatížení nepraskly, (týká se pouze tyčí pro zjištění meze únavy v ohybu) byly v polovině své délky přeříznuty a vzorek byl

odebrán stejným způsobem.

Tabulka III Označení vybraných zkušebních tvář

Průřez tloušče	Tahová zkouška			Plochý ohyb		
	3x10	6x10	6x10N	t1.3	t1.6	t1.6 Neob
Tavba 1	11	12				
Tavba 2		22				
Tavba 3	31, 32					
Tavba 7	74	71, 73	72			
Tavba 8	82	84	83	8E SG	8E 8B	8F 8E



obr.4.2.1 - Místo odebrání vzorku pro zjištění struktury
a/ tahová zkouška
b/ plochý ohyb

Odebraný vzorek byl zalit do dentacrylu, zbrúšen a vyleštěn. Před leptáním byl ve struktuře vyhodnocen grafit podle normy ČSN 42 0461 při stonásobném zvětšení. Viz kapitola 2.4 této práce.

Výsledky jsou uspořádány do tabulky IV a výsledné struktury z optického mikroskopu NEOPHOT jsou patrné z obrázků 4.2.1 - 4.2.18

Struktura po naleptání 3% Nitalem je rovněž na obrázcích 4.2.1 - 4.2.18 a její vyhodnocení v tabulce V. Leptáno bylo 1 1/2 sec., použité zvětšení 200x.

Tabulka IV H od n o c e n í g r a f i t u d l e Č S N 4 2 0 4 6 1

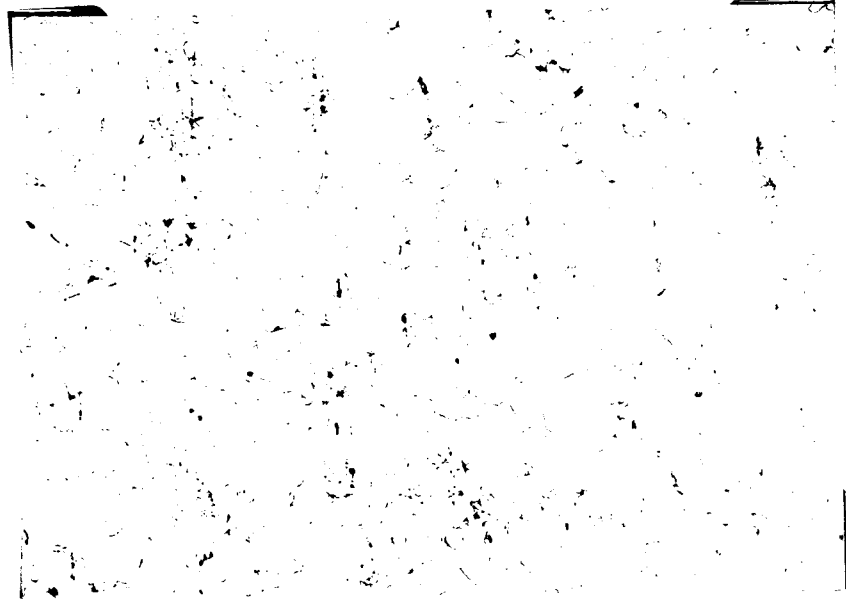
Tabulka 1	V y h o d n o c e n í		Velikost / μm /
11	IA7	lupínkový rovnoměrně rozložený	15 - 30
12	IA6	lupínkový rovnoměrně rozložený	30 - 60
Tabulka 2			
22	IA5	lupínkový rovnoměrně rozložený	60 - 120
Tabulka 3			
31	I-IIC6	lupínkový až pavoučkovitý rozložení smíšené	30 - 60
32	I-IVA5	lupínkový až vločkový rozložení rovnoměrné	60 - 120
Tabulka 7			
71	IA5	lupínkový rovnoměrně rozložený	60 - 120
72	IA6	lupínkový rovnoměrně rozložený	30 - 60
73	IA6	lupínkový rovnoměrně rozložený	30 - 60
74	IA6	lupínkový rovnoměrně rozložený	30 - 60
Tabulka 8			
82	IA7	lupínkový rovnoměrně rozložený	15 - 30
83	IC8	lupínkový rozložení smíšené	15

Pokračování tabulky IV

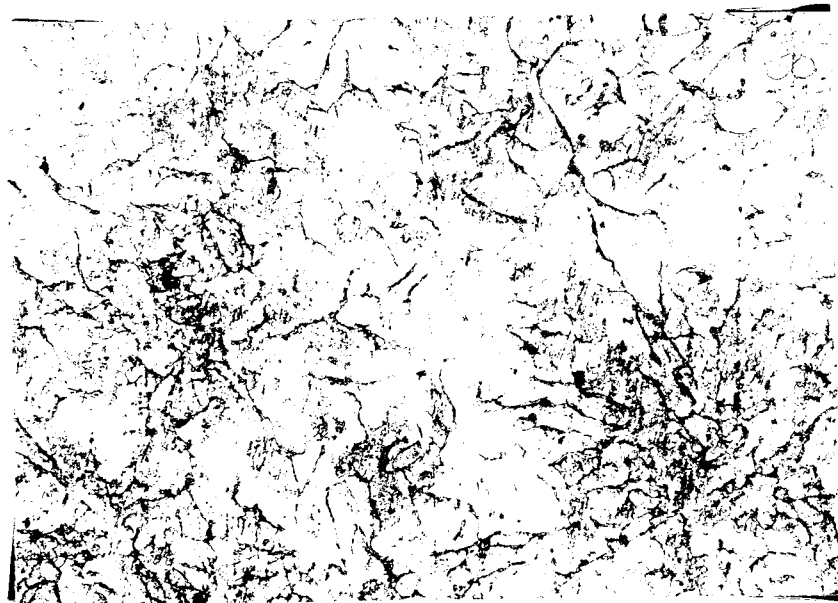
84	IA6	lupínkový rovnoměrně rozložený	30 - 60
8E tl.6	I _{ps} A6	lupínkový až vločkový rovnoměrně rozložený	30 - 60
8E tl.6 obrob.	IA5	lupínkový rovnoměrně rozložený	60 - 120
8E tl.6	IA6	lupínkový rovnoměrně rozložený	30 - 60
8B	IA5	lupínkový rovnoměrně rozložený	60 - 120
8F	IA6	lupínkový rovnoměrně rozložený	30 - 60
8G	IA6	lupínkový rovnoměrně rozložený	30 - 60

Tabulka V Vyhodnocení množství perlitu

Tavba	Vzorek	Označ.	Plocha / % /	Tavba	Vzorek	Označ.	Plocha / % /
1	11	P50	40 - 65	8	82	I _{ps} 70	65 - 80
	12	P50	40 - 65		83	I _{ps} 50	40 - 65
2	22	P50	40 - 65		84	I70	65 - 80
3	31	P15	10 - 40		8Etl.6	I _{ps} 70	65 - 80
	32	I _{ps} 15	10 - 40		8Etl.3	I _{ps} 70	65 - 80
7	71	P70	65 - 80		8Etl.6 obrob.	I _{ps} 70	65 - 80
	72	P50	40 - 65		8B	P15	10 - 40
	73	I70	65 - 80		8F	I70	65 - 80
	74	I _{ps} 50	40 - 65		8G	I50	40 - 65



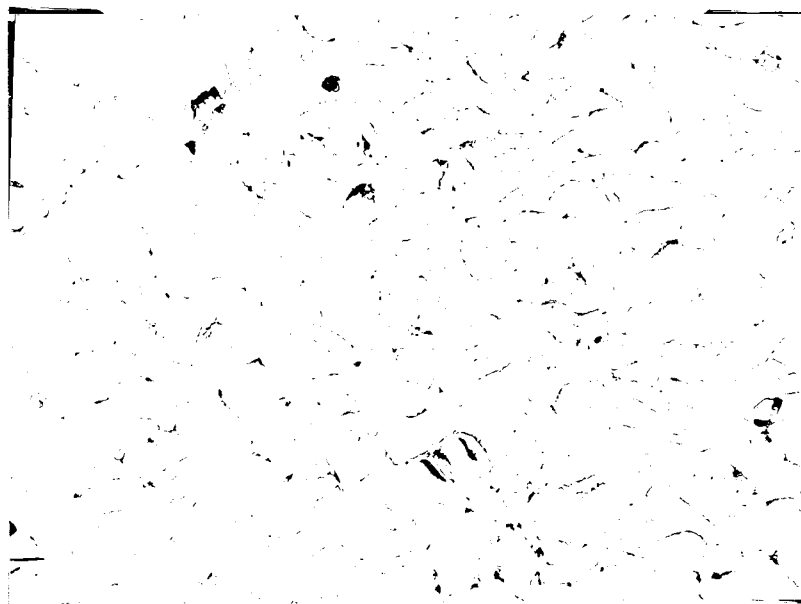
100x



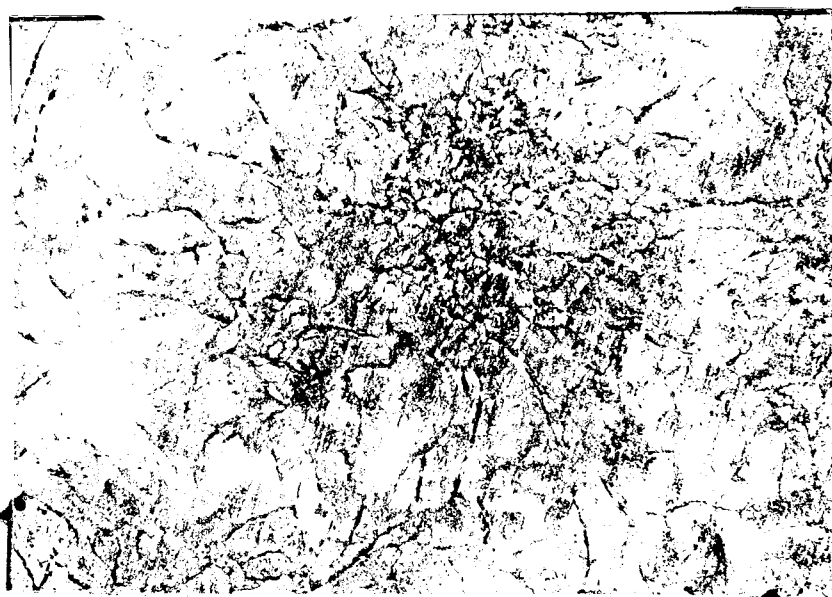
Lept.Nital

200x

obr.4.2.1 - Struktura ŠL. tavba 1 vzorek 11



100x



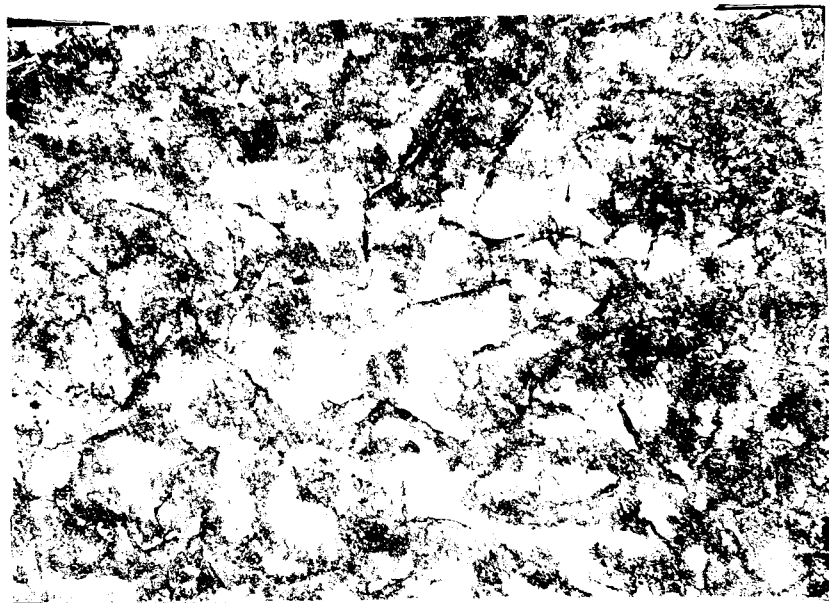
Lept.Nitel

200x

obr.4.2.2 - Struktura ŠL. tevba 1 vzorek 12



100x



Lept.Nital

200x

obr.4.2.3 - Struktura ŠL. tavba 2 vzorek 22



100x



Lept.Nital

200x

obr.4.2.4 - Struktura ŠL. tavba 3 vzorek 31



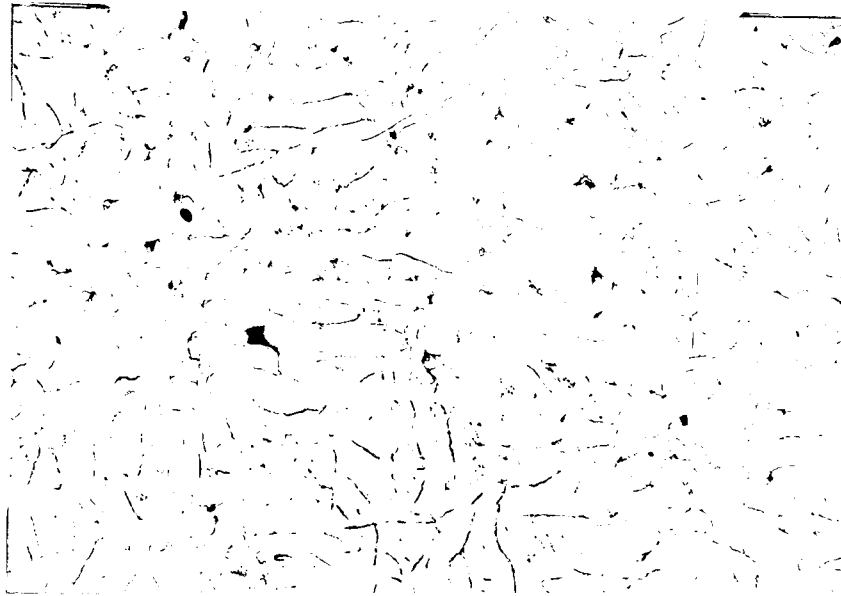
200x



Lept.Nital

200x

obr.4.2.5 - Struktura ŠL. tavba 3 vzorek 32



100x



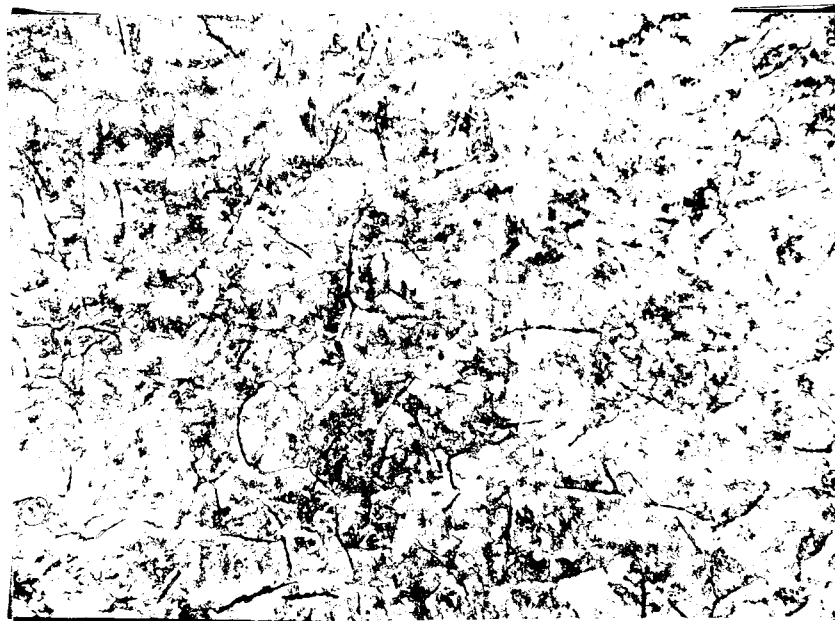
Lept.Nital

200x

obr.4.2.6 - Struktura ŠL. tavba 7 vzorek 71



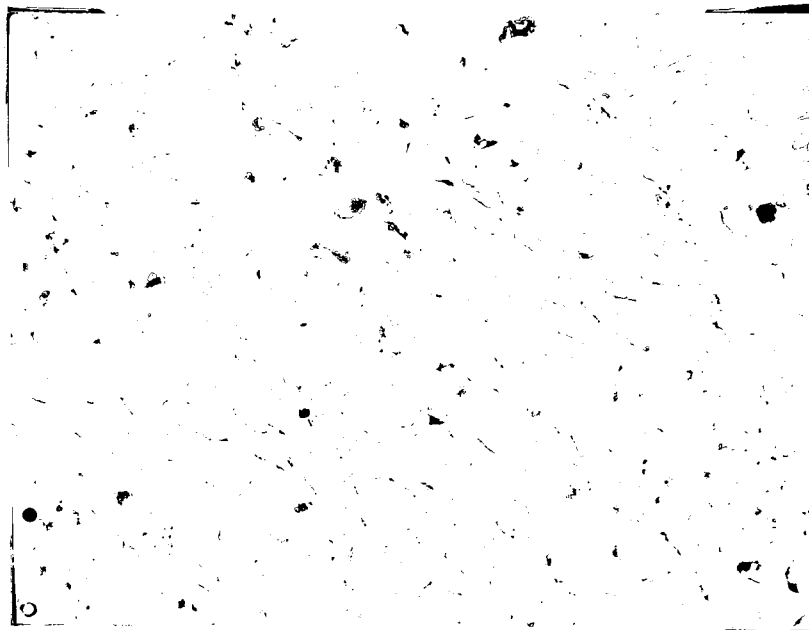
100x



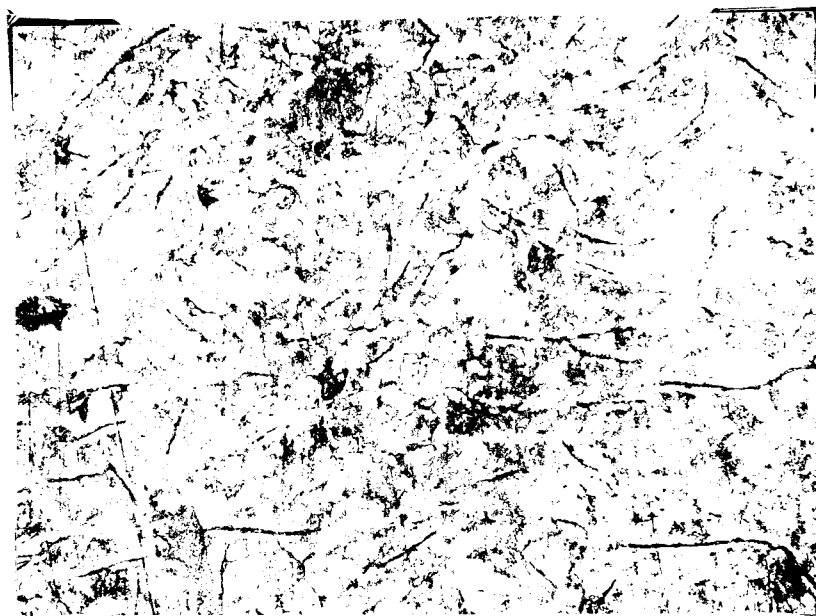
Lept.Nitel

200x

obr.4.2.7 - Struktura ŠL. tavba 7 vzorek 72



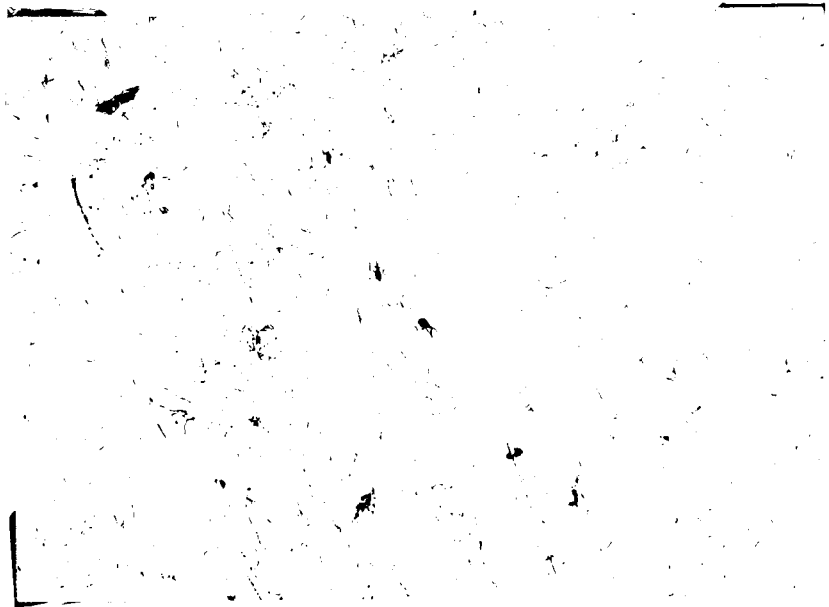
100x



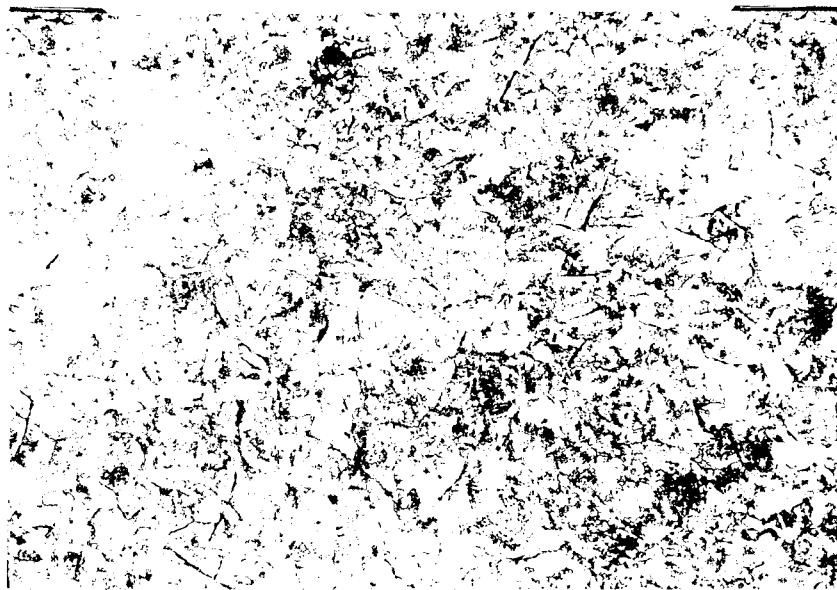
lept.Nitel

200x

obr.4.2.8 - Struktura ŠL. tavba 7 vzorek 73



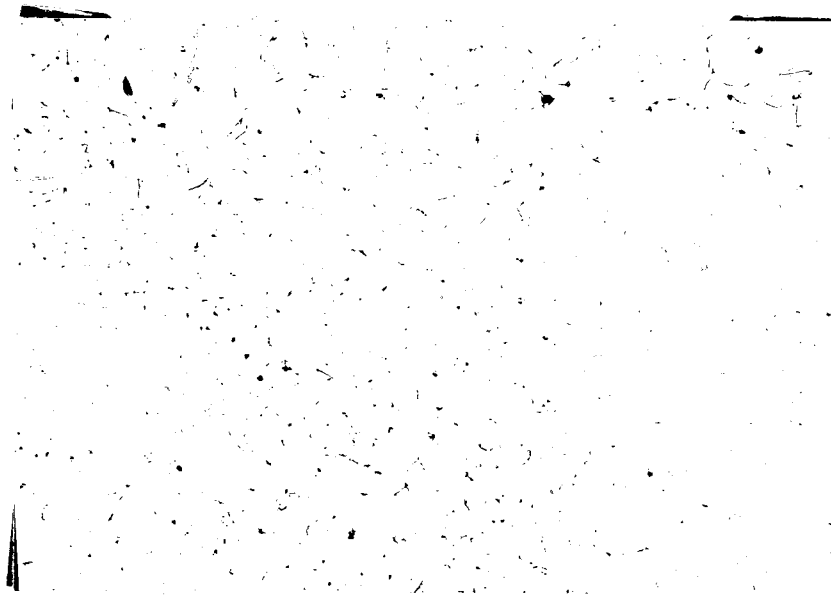
100x



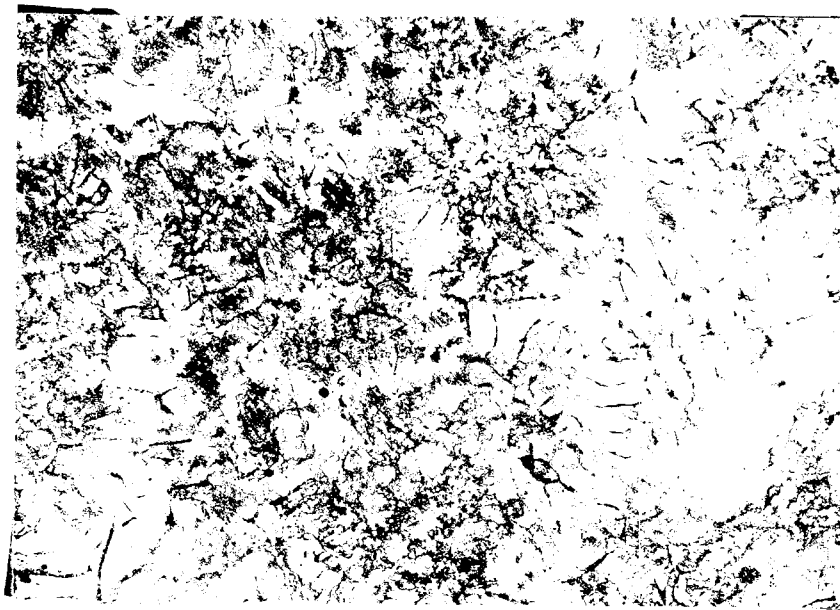
Lept.Nital

200x

obr.4.2.9 - Struktura ŠL. tavba 7 vzorek 74



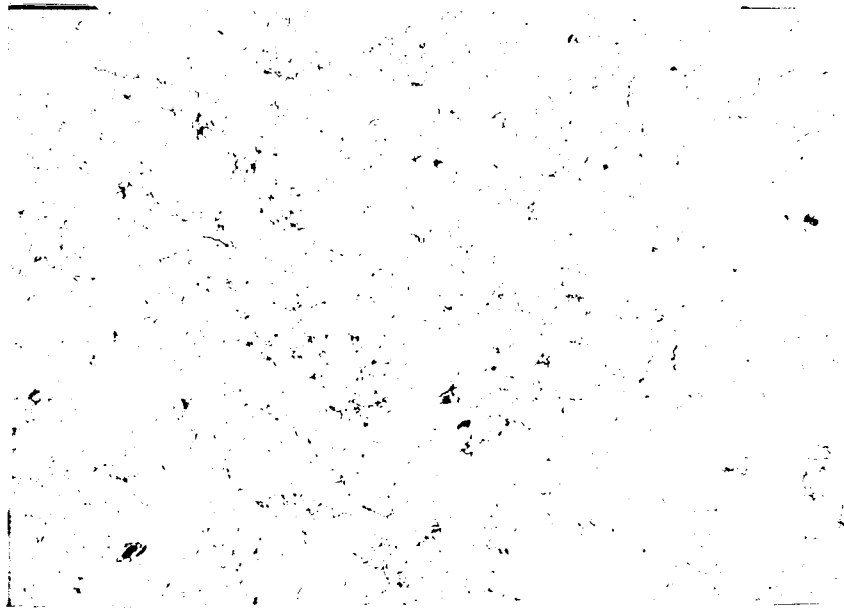
100x



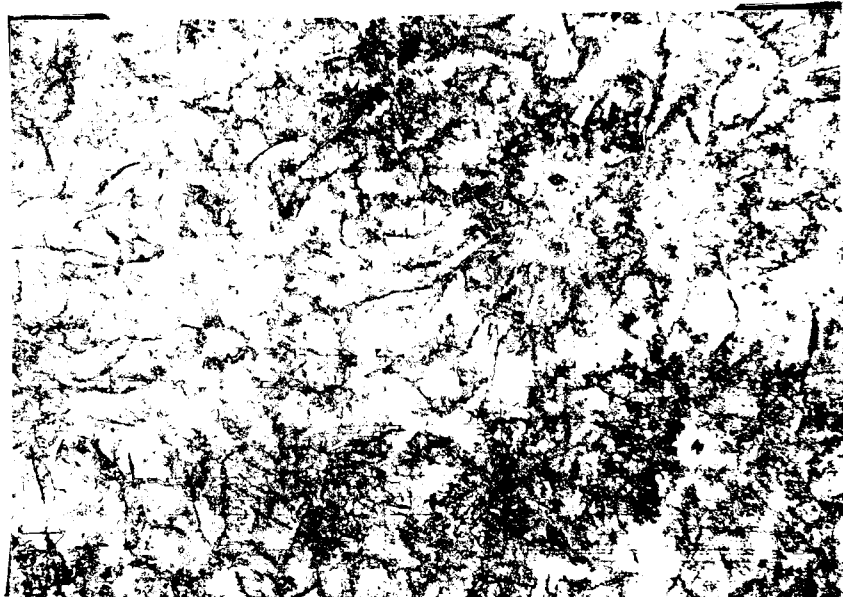
Lept.Nital

200x

obr.4.2.10 - Struktura ŠL. tavba 8 vzorek 82



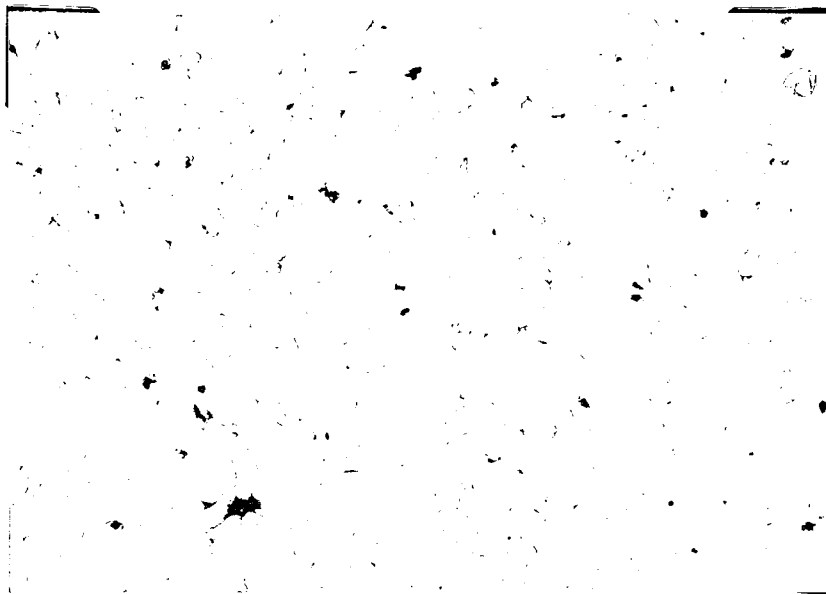
100x



Lept.Nital

200x

obr.4.2.11 - Struktura ŠL. tavba 8 vzorek 83



100x



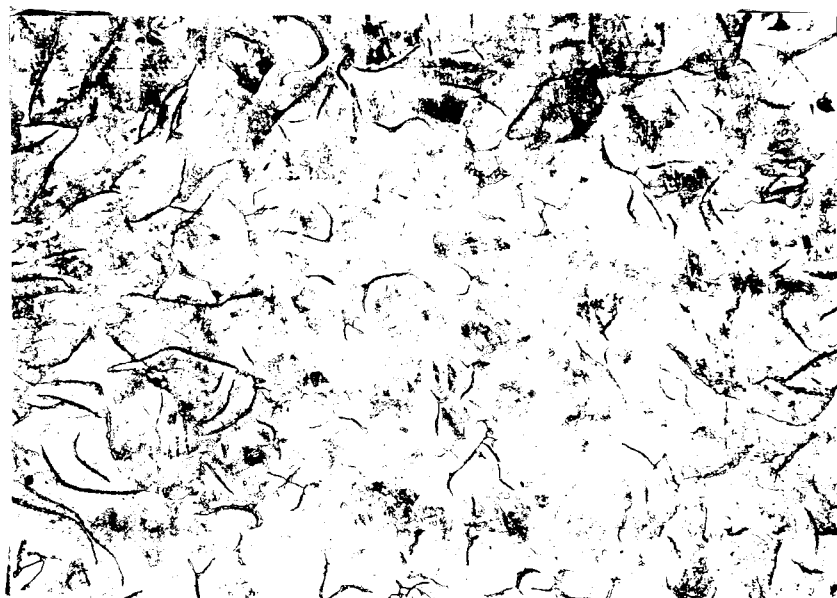
Lept.Nital

200x

obr.4.2.12 - Struktura ŠL. tavba 8 vzorek 84



100x



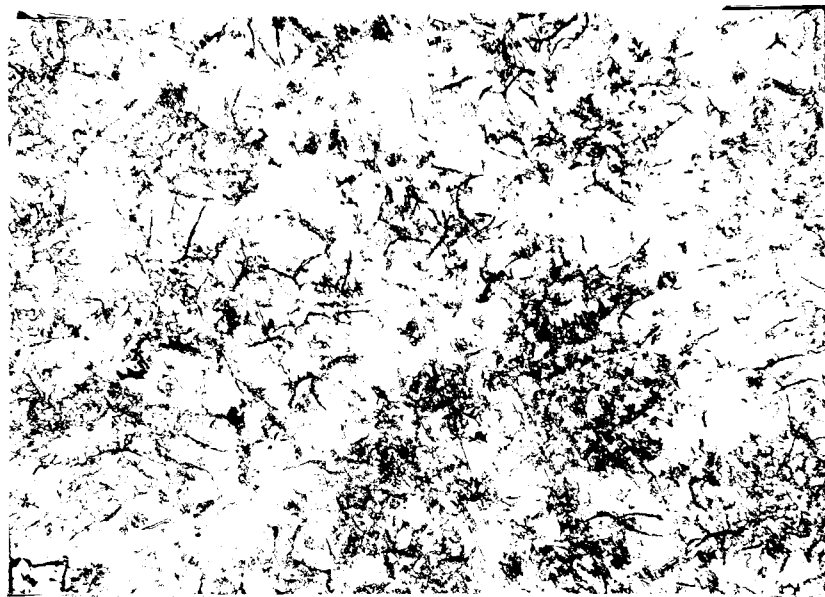
Lept.Nital

200x

obr.4.2.13 - Struktura ŠL. tevba 8 vzorek 8B



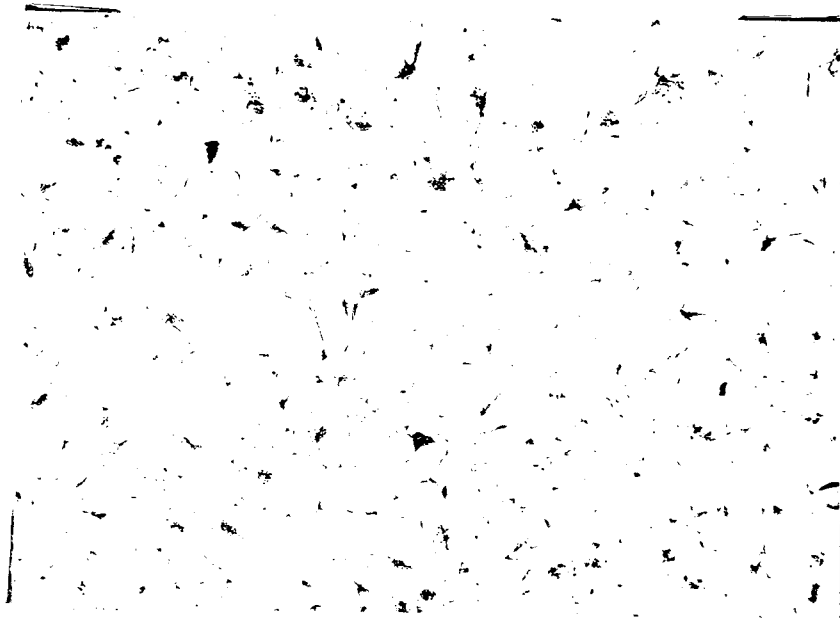
100x



Lept.Nital

200x

obr.4.2.14 - Struktura ŠL. tevba 8 vzorek 8E tl.3



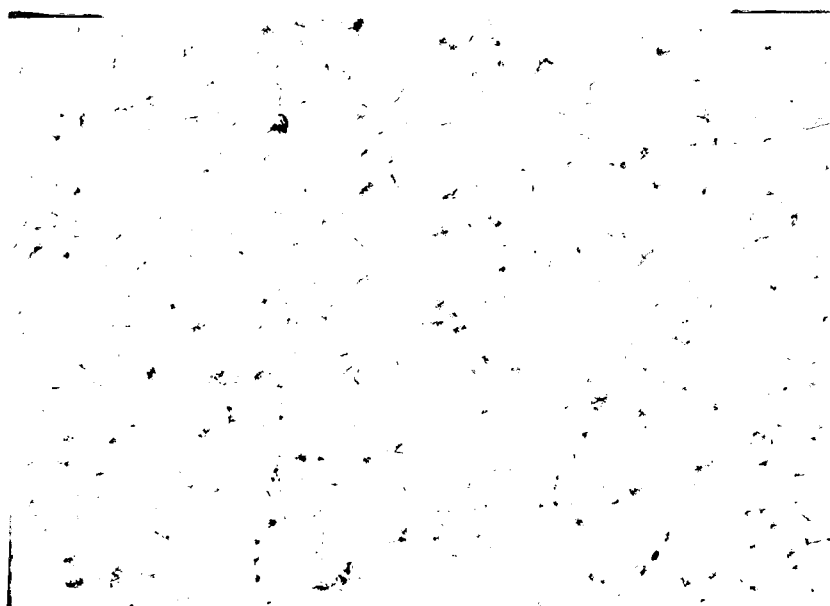
100x



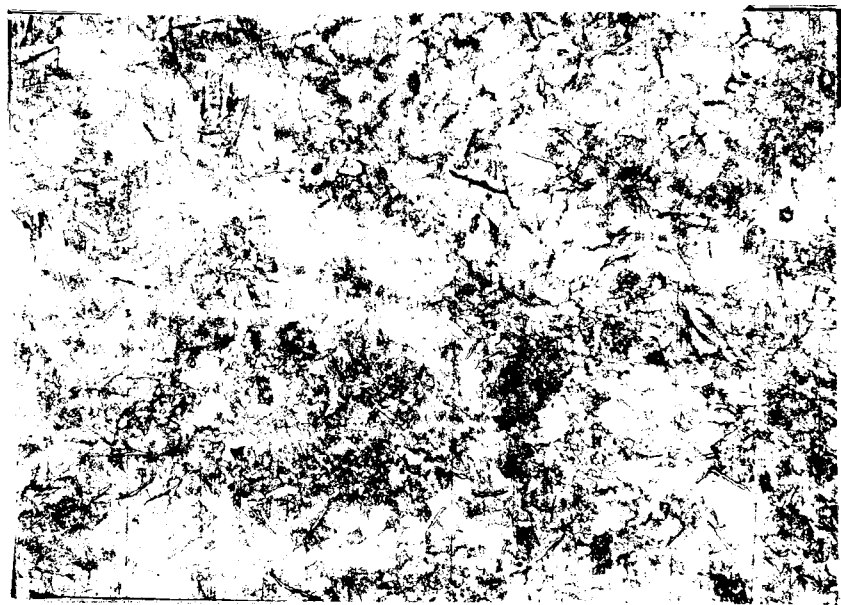
Lept.Nital

200x

obr.4.2.15 - Struktura Šl. tavba 8 vzorek 8E tl.6
obrob.



100x



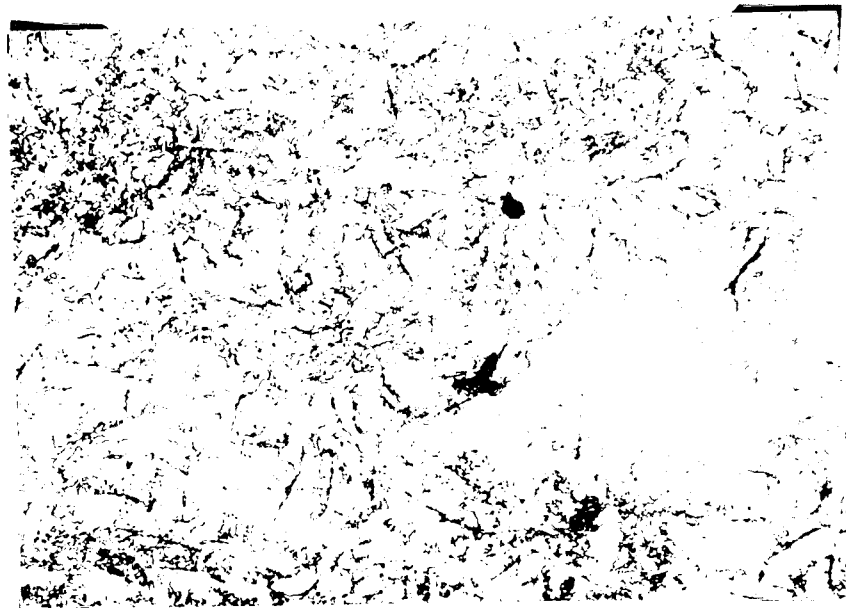
Lept.Nital

200x

obr.4.2.16 - Struktura ŠL. tavba 8 vzorek 8E tl.6



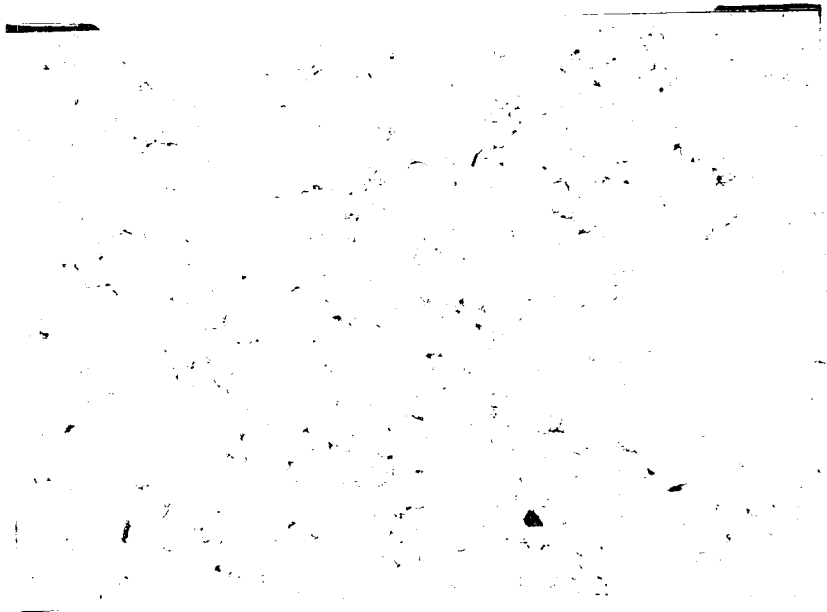
100x



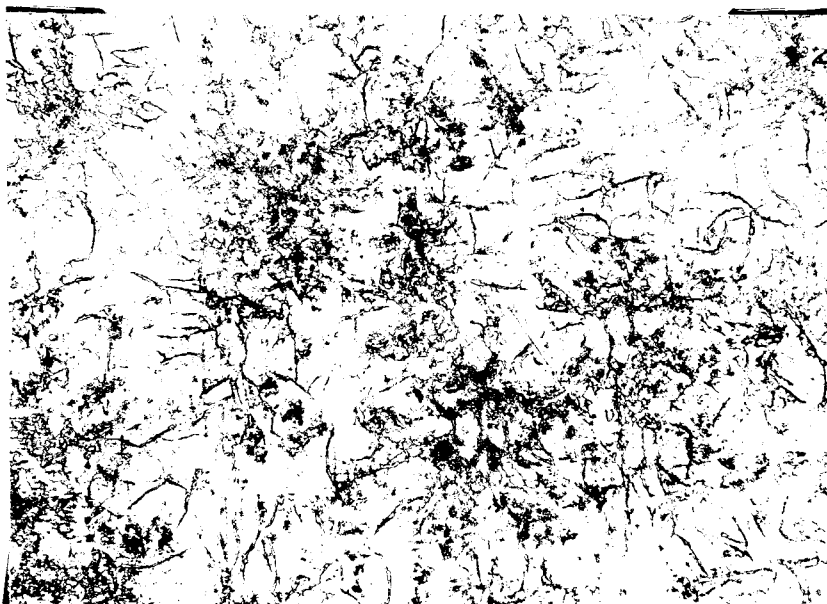
Lept.Nitel

200x

obr.4.2.17 - Struktura ŠL. tavbe 8 vzorek 8F



100x



Lept.Nital

200x

obr.4.2.18 - Struktura ŠL. tavba 8 vzorek 8G

Vzorky tavby 1 jsou tvořeny lupínkovým rovnoměrně rozloženým grafitem velikosti 15 - 60 μm , uloženým v ocelové matici. Litina krystalizovala jako mírně podeutektická.

Vzorky tavby 2 jsou tvořeny lupínkovým rovnoměrně rozloženým grafitem velikosti 60 - 120 μm . Matrice je perlitická, s obsahem perlitu 40 - 65 %. Litina krystalizovala jako podeutektická.

Vzorky tavby 3 jsou tvořeny lupínkovým, pavoučkovitým až vločkovitým grafitem, matrice je perlitická s obsahem perlitu 10 - 40 %. Velikost grafitových lupínek 30 - 60 μm . Litina krystalizuje jako nadeutektická.

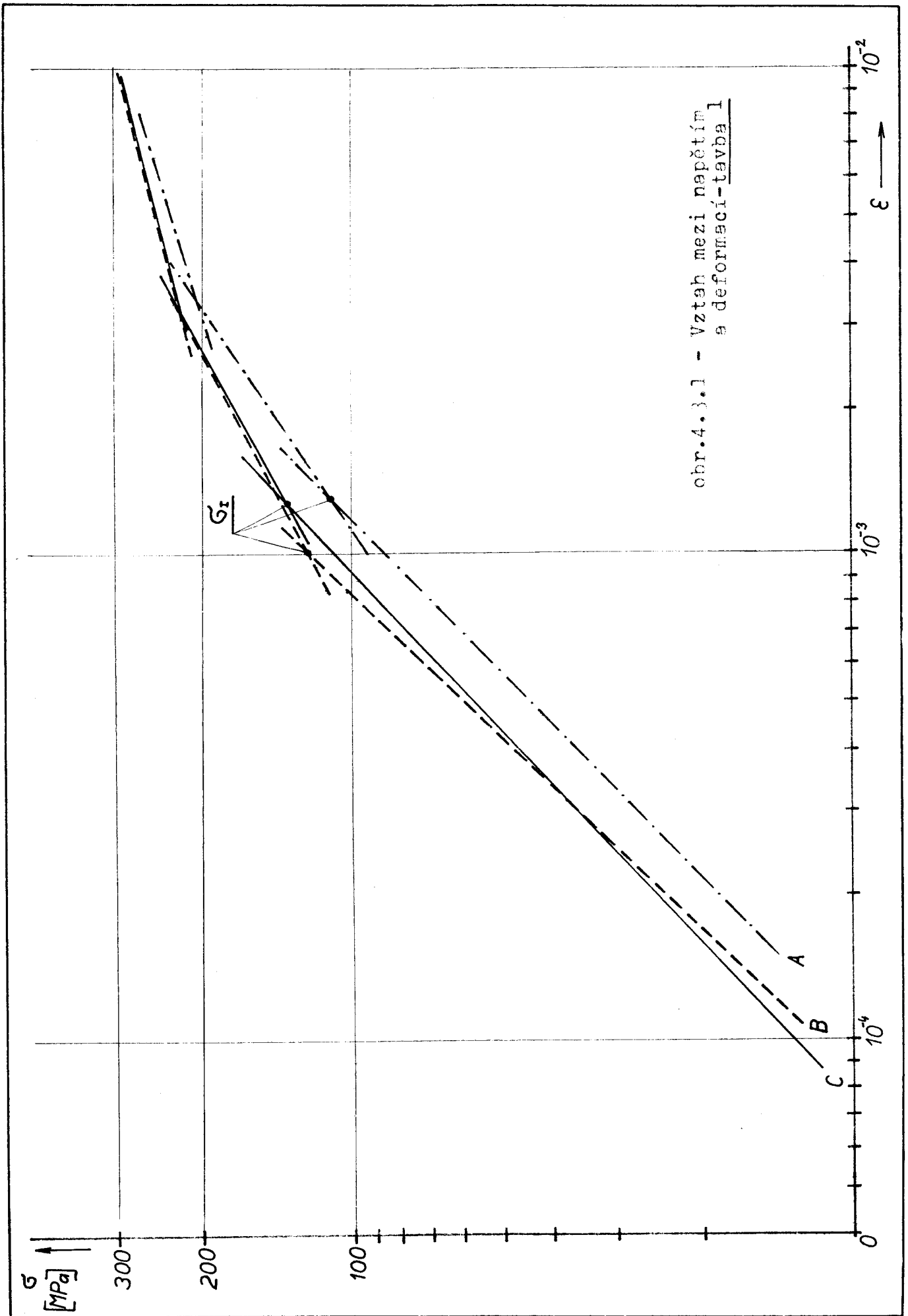
Vzorky tavby 7 jsou tvořeny lupínkovým, rovnoměrně rozloženým grafitem o velikosti 30 - 60 μm , základní matrice perlitická s obsahem perlitu 40 - 80 %.

Vzorky tavby 8 jsou tvořeny lupínkovým rovnoměrně rozloženým grafitem velikosti ponejvíce 30 - 60 μm , základní matrice je perlitická s obsahem perlitu 40 - 80 %. Litina krystalizovala jako mírně podeutektická.

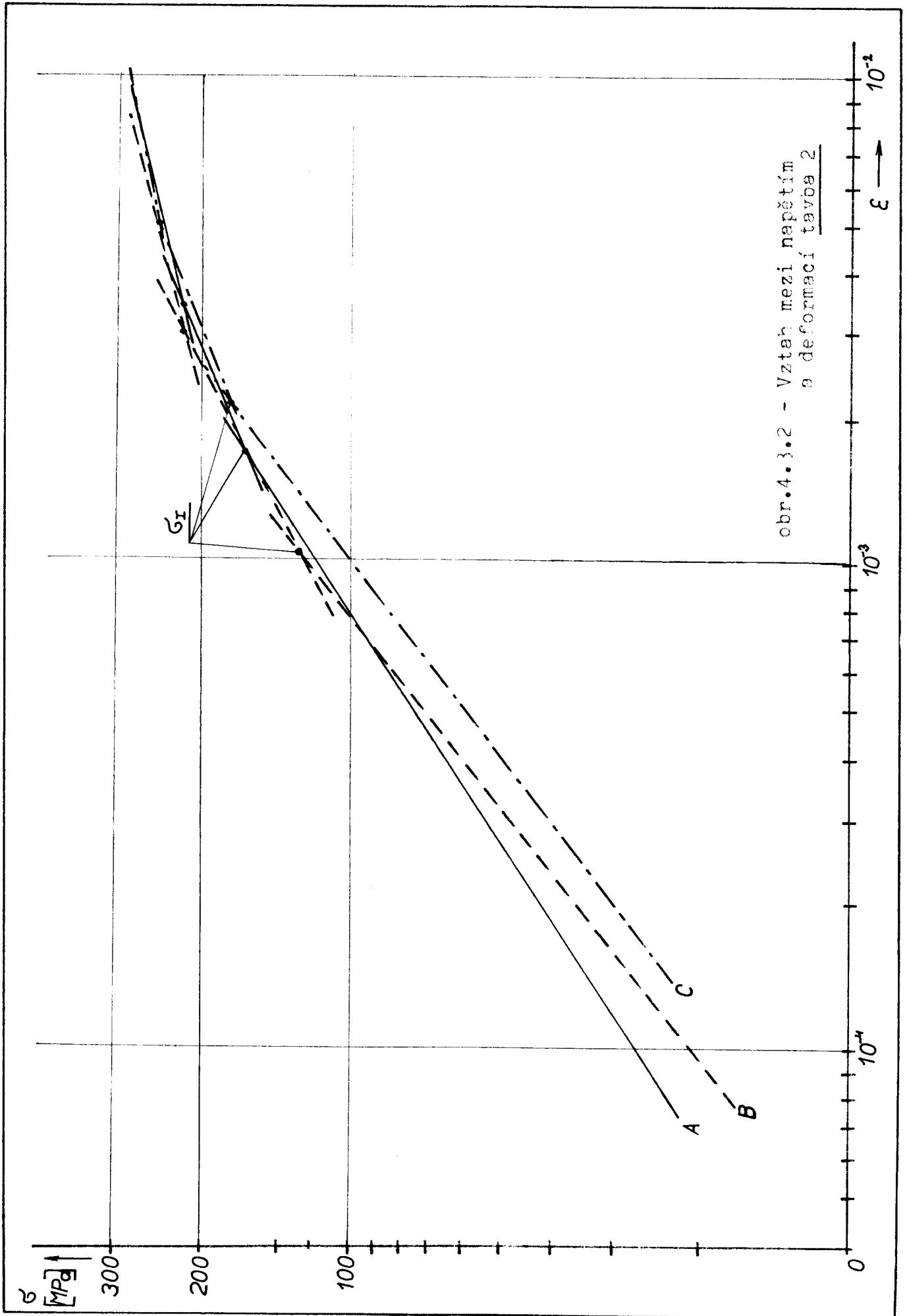
Na vzorcích je patrné místy špatné vyleštění, ale v možnostech nebylo získání lepšího a kvalitnějšího výbrusu, protože na dvou brusných strojích a na jediném leštícím kotouči, které byly k dispozici, probíhaly nejen DP, ale i výuka, bylo zde broušeno i sklo a proto nebyly přes všechnu snahu získány kvalitnější výbrusy.

4.3 Vyhodnocení tahových diagramů

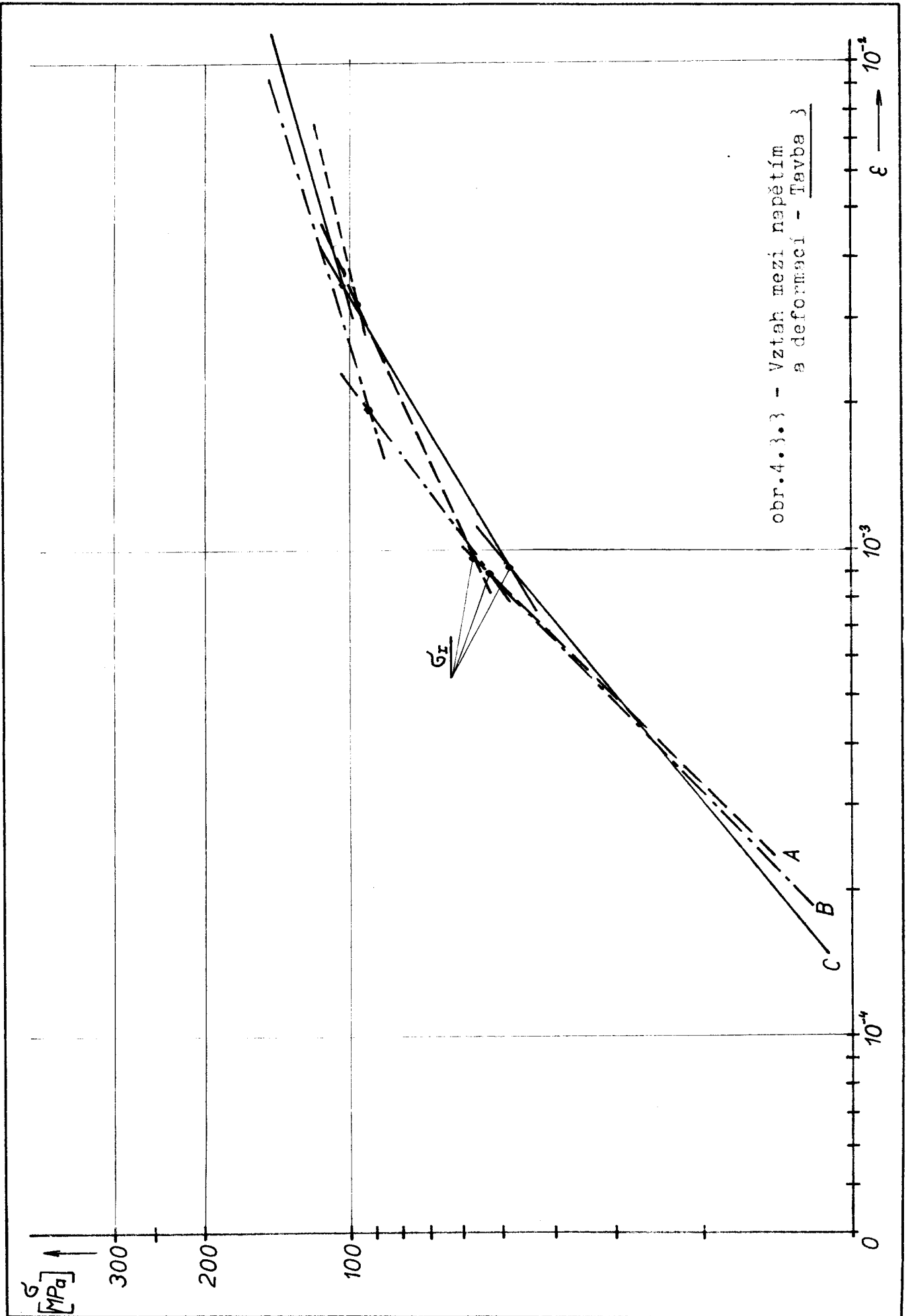
Z tahového diagramu tyčí o ϕ 18mm z VÚT Brno byla vyhodnocována závislost σ na ϵ v souřadnicích $\lg \sigma - \lg \epsilon$ dle kapitoly 3.2. této práce. Získané výsledky jsou zachyceny na obrázcích 4.3.1 - 4.3.5



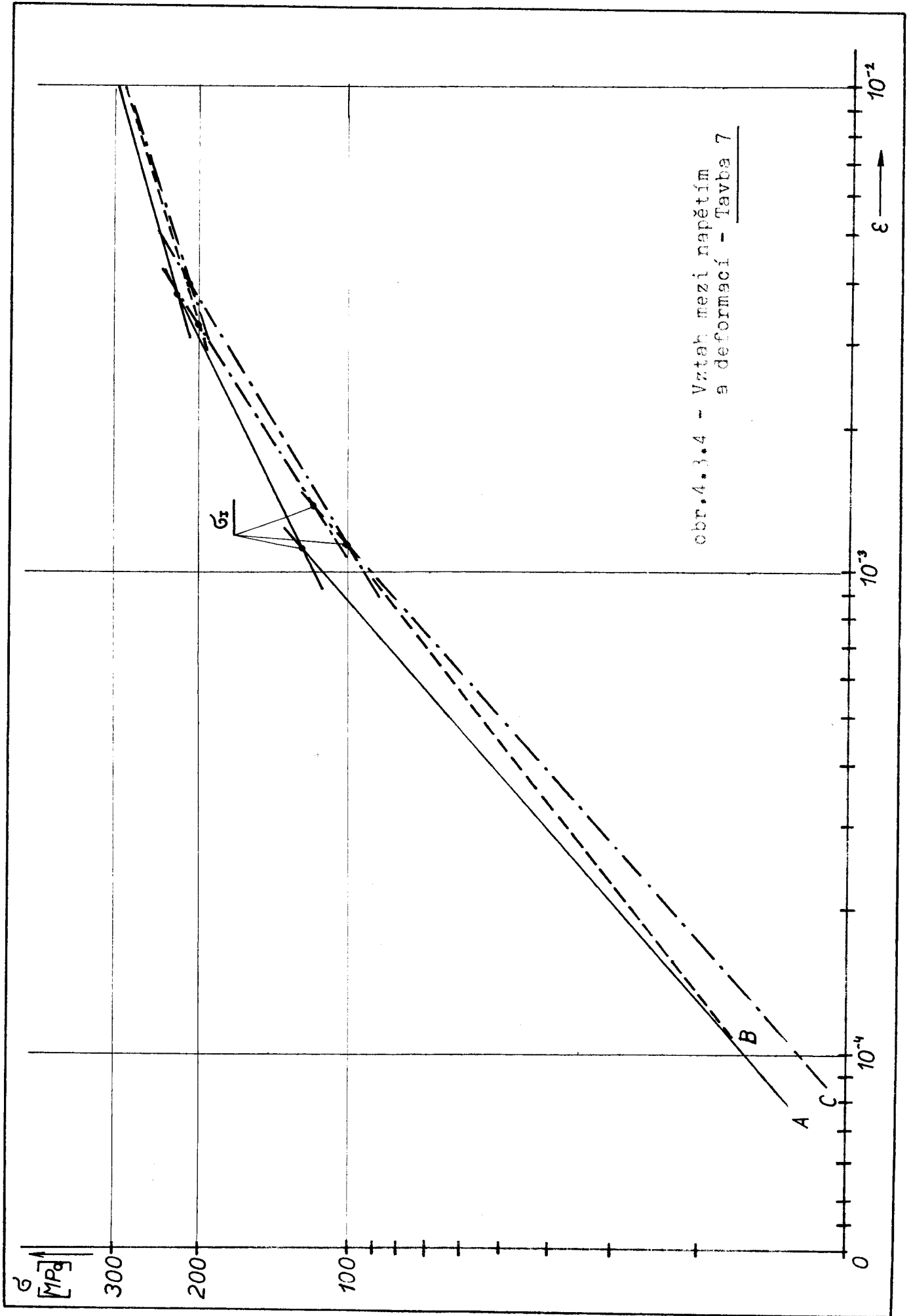
obr.4.3.1 - Vztah mezi napětím a deformací - tabba 1



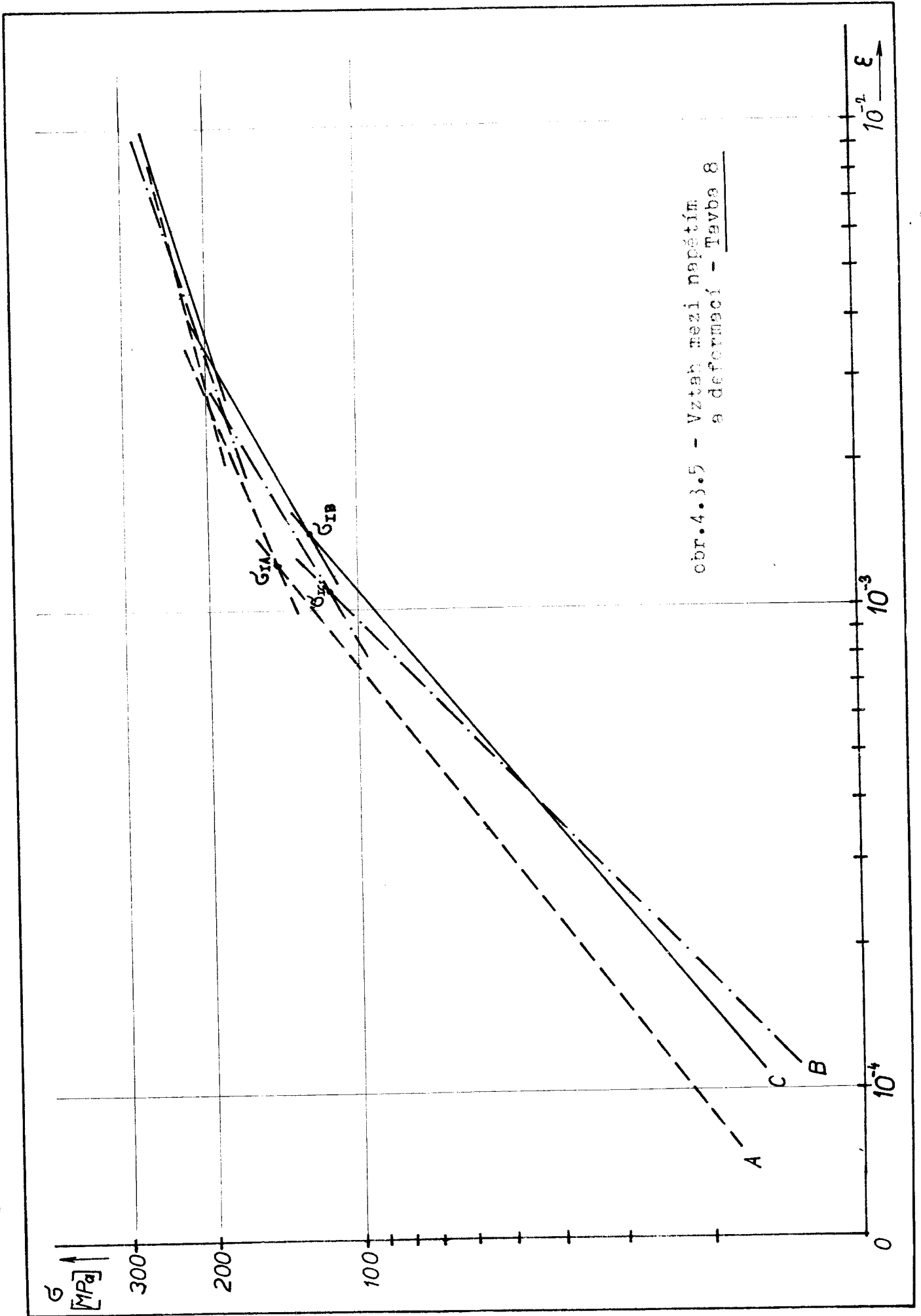
obr.4.3.2 - Vztah mezi napětím a deformací tavba 2



obr.4.3.3 - Vztah mezi napětím a deformací - Tavba 3



obr.4.3.4 - Vztah mezi napětím a deformací - Tabba 7



obr.4.3.5 - Vztah mezi napětím a deformací - Tabka 8

Vztah mezi celkovou deformací a napětím má u všech taveb předpokládaný průběh. Existují zde tři odlišné oblasti deformace, charakterizované příslušnými exponenty n_I ; n_{II} ; n_{III} . Mezní napětí těchto oblastí odpovídají napětím σ_I ; σ_{II} ; σ_{Pt} . Hodnoty všech směrnic i všech mezních napětí jsou shrnuty do tabulky VI.

Tabulka VI Hodnoty mezních napětí a směrnic, zjištěných u tyčí ϕ 18mm při tahové zkoušce.

Tavba	σ_I	σ_{II}	σ_{Pt}	n_I	II	n_{III}
	/MPa/	/MPa/	/MPa/			
1	122	214	272,6	0,95	0,58	0,26
2	156	230	271,3	0,723	0,44	0,23
3	50,6	96,6	133,6	0,92	0,59	0,273
7	116	220	272	0,842	0,57	0,295
8	128	193	259	0,84	0,48	0,276

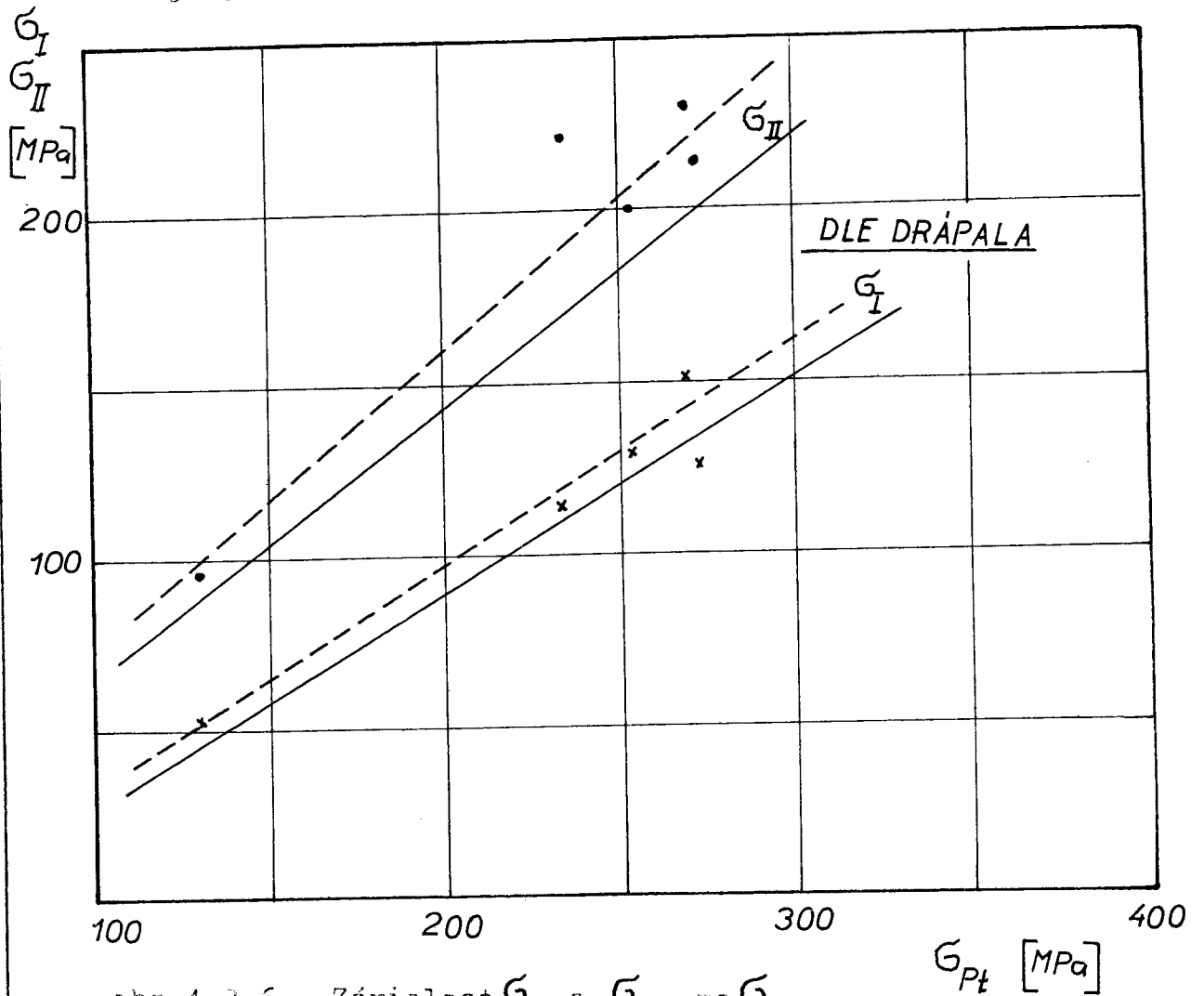
Dále viz strana 54e

4.4 Zjištění únavové pevnosti

Pro určení meze únavy u taveb šedé litiny byly použity údaje, získané při zkoušce ohybem za rotace, míjivým tahem a plochým ohybem. Dle úvodu v kapitole 3.3 této práce byly sestrojeny závislosti napětí na počtu cyklů v souřadnicích

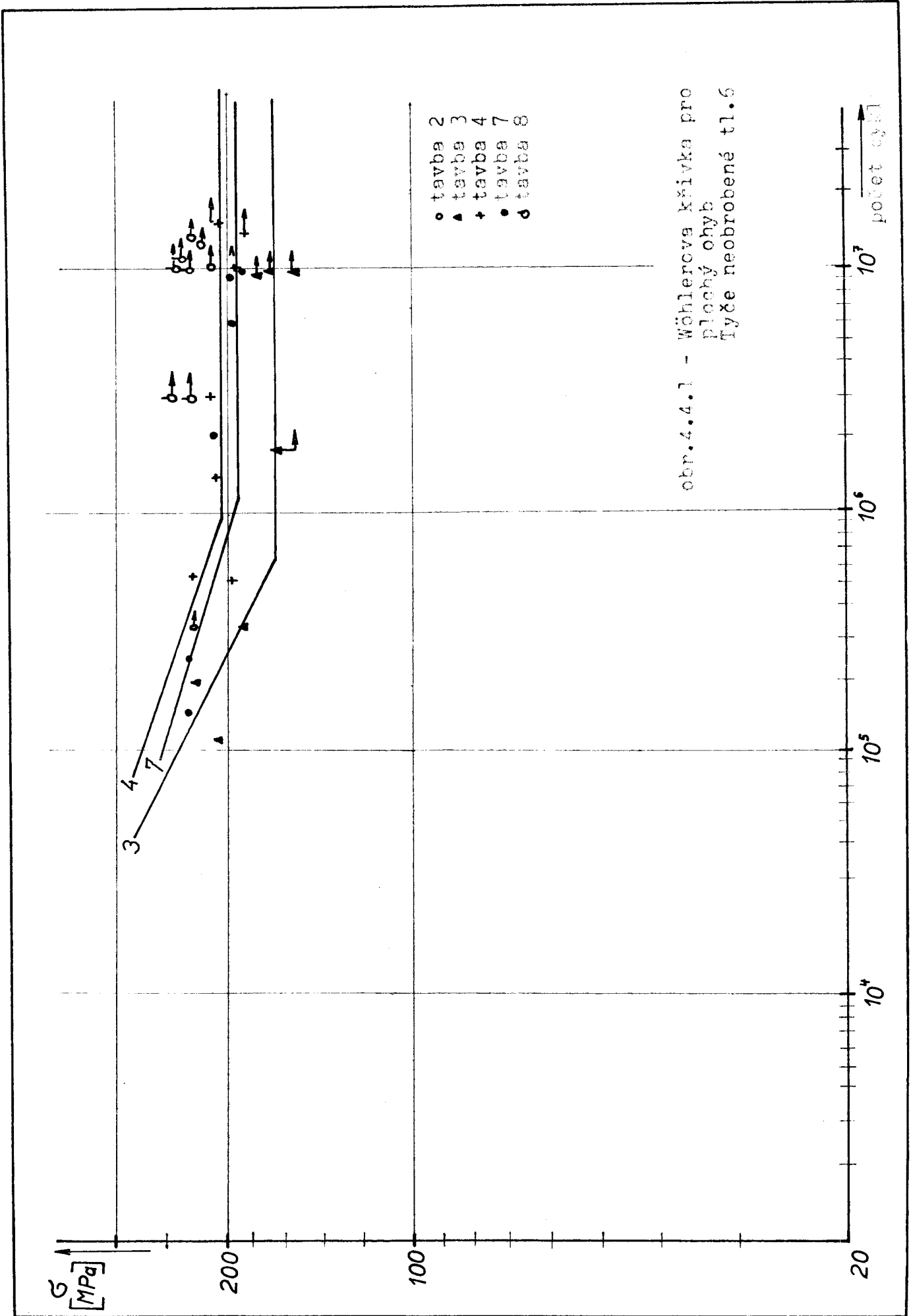
$\sigma - \lg n$. Získané závislosti jsou zachyceny na obrázcích 4.4. 1 - 4.4.6. Závislosti u některých taveb nemohly být vyhodnoceny pro malý počet zkoušených vzorků nebo pro velký, netypický rozptyl naměřených údajů, při němž by sestrojení W-křivky bylo spojeno s poměrně velkou nepřesností.

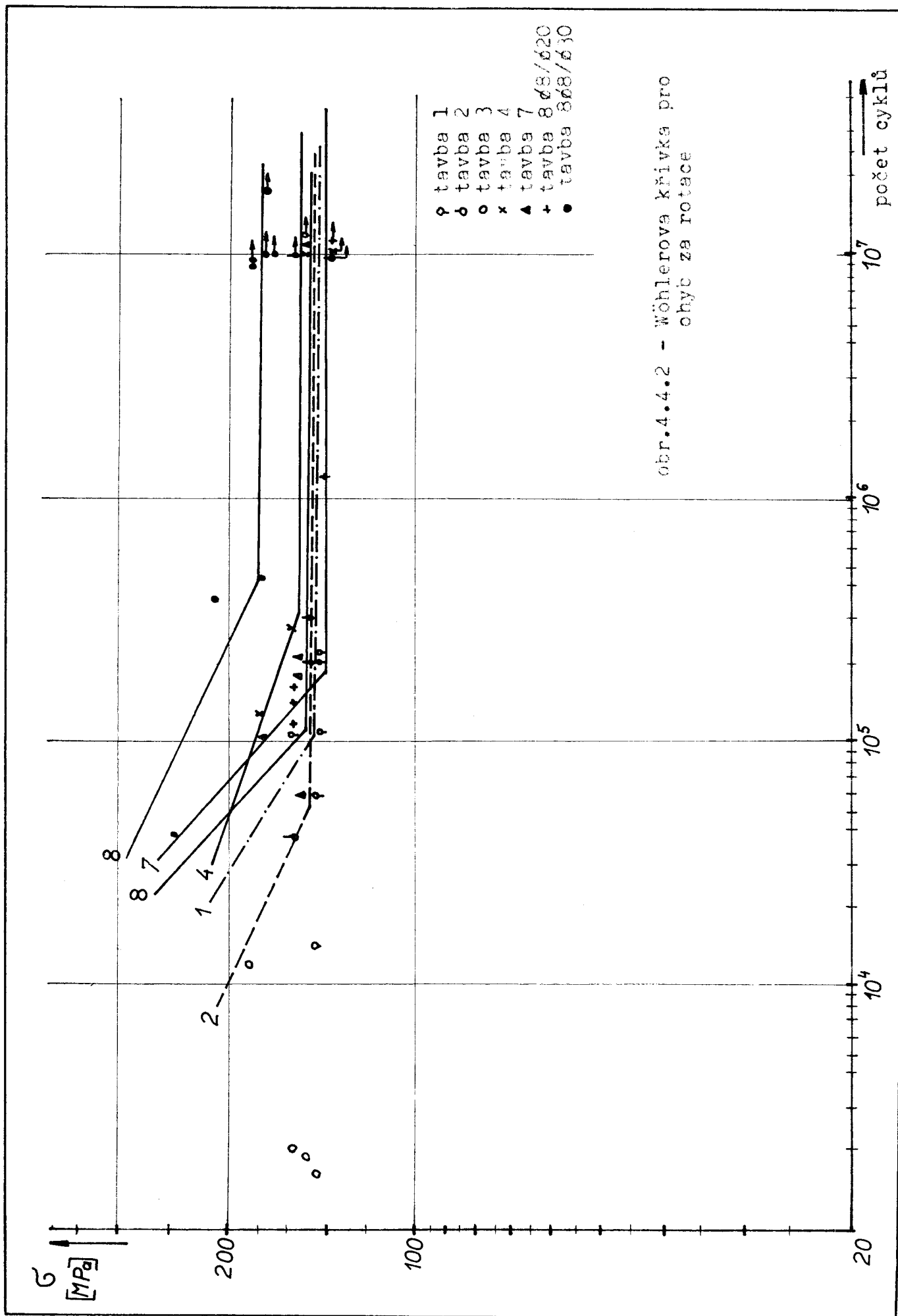
Hodnoty σ_I a σ_{II} , odečtené z diagramů 4.3.1 až 4.3.5 jsou znázorněny v závislosti na σ_{Pt} na obrázku 4.3.6 Pro porovnání jsou uvedeny hodnoty, získané prof. Drápalem v/III/. Jak je z diagramu patrné, námi získané údaje jsou v dobrém souladu s výsledky prof. Drápala.



obr.4.3.6 - Závislost σ_I a σ_{II} na σ_{Pt} .

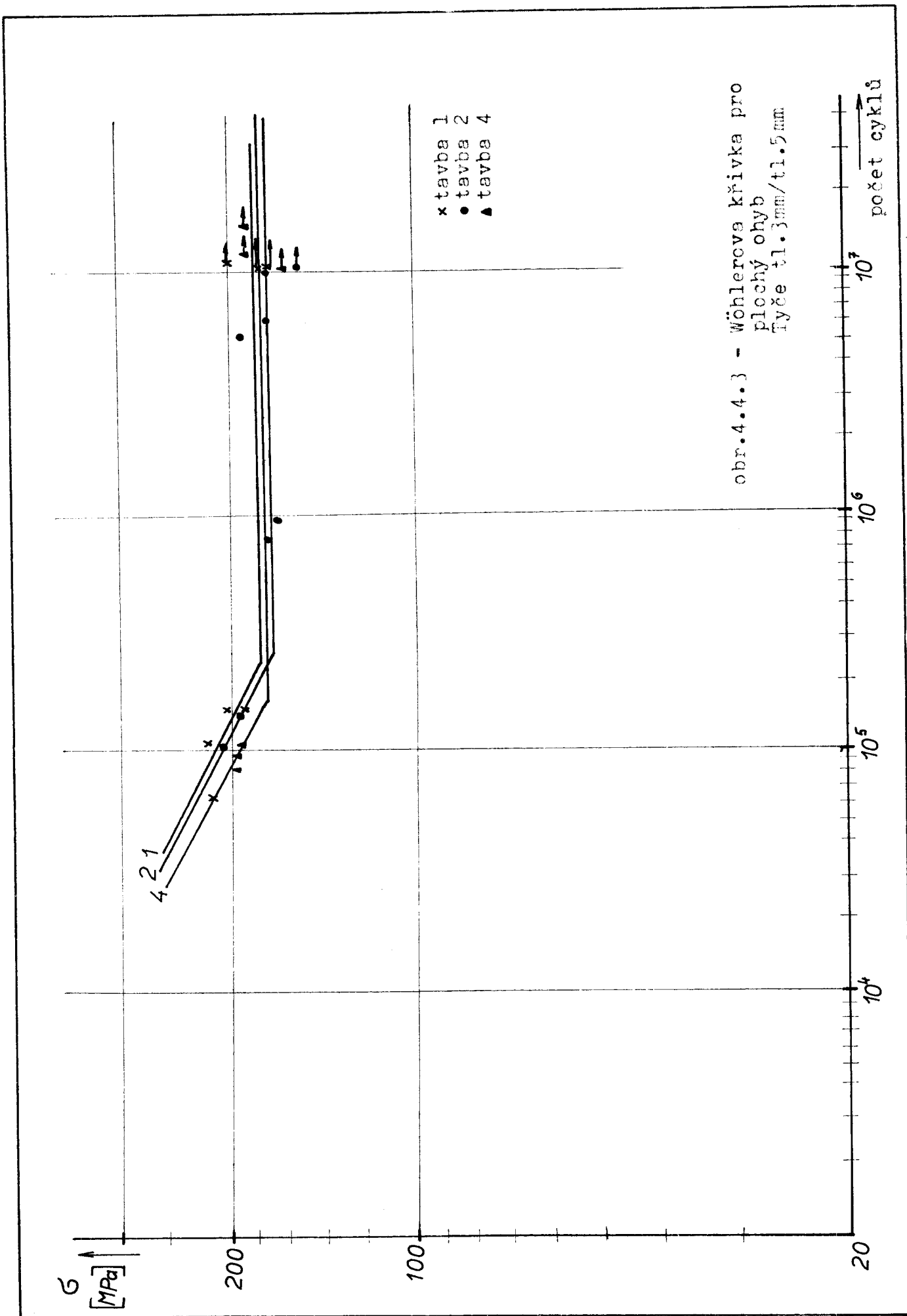
Dále kapitola 4.4

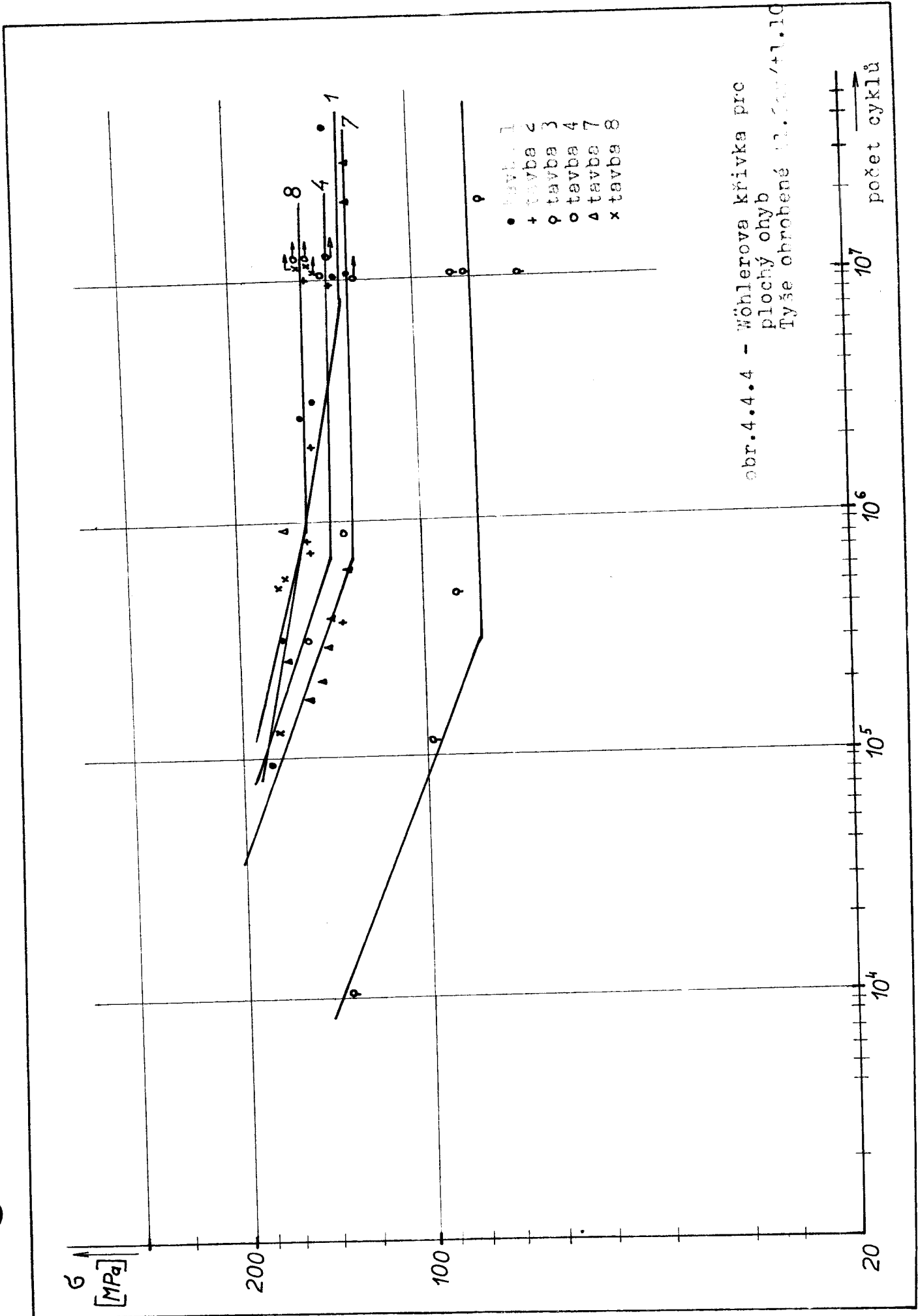




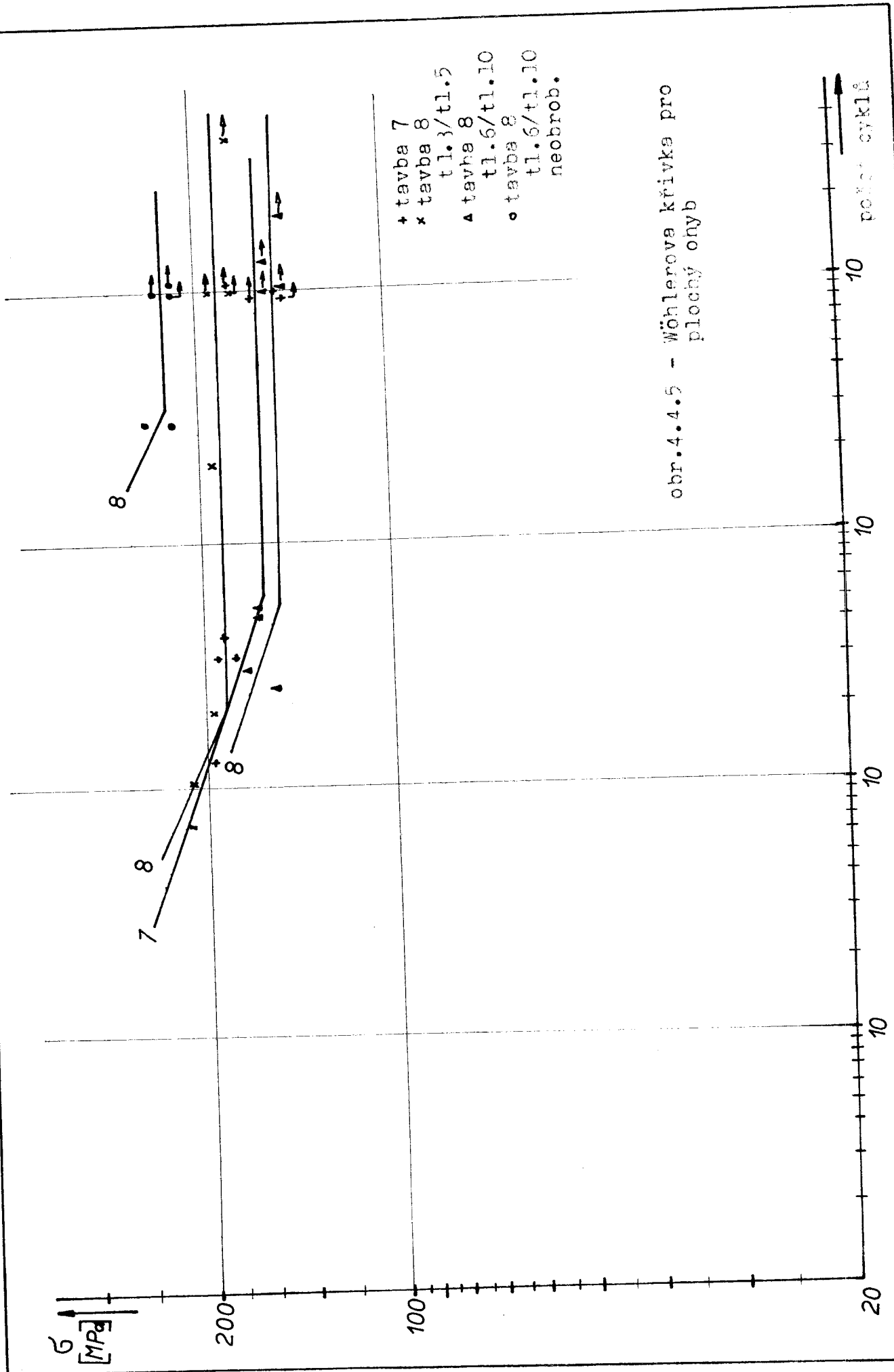
obr.4.4.2 - Wöhlerova křivka pro
ohyb za rotace

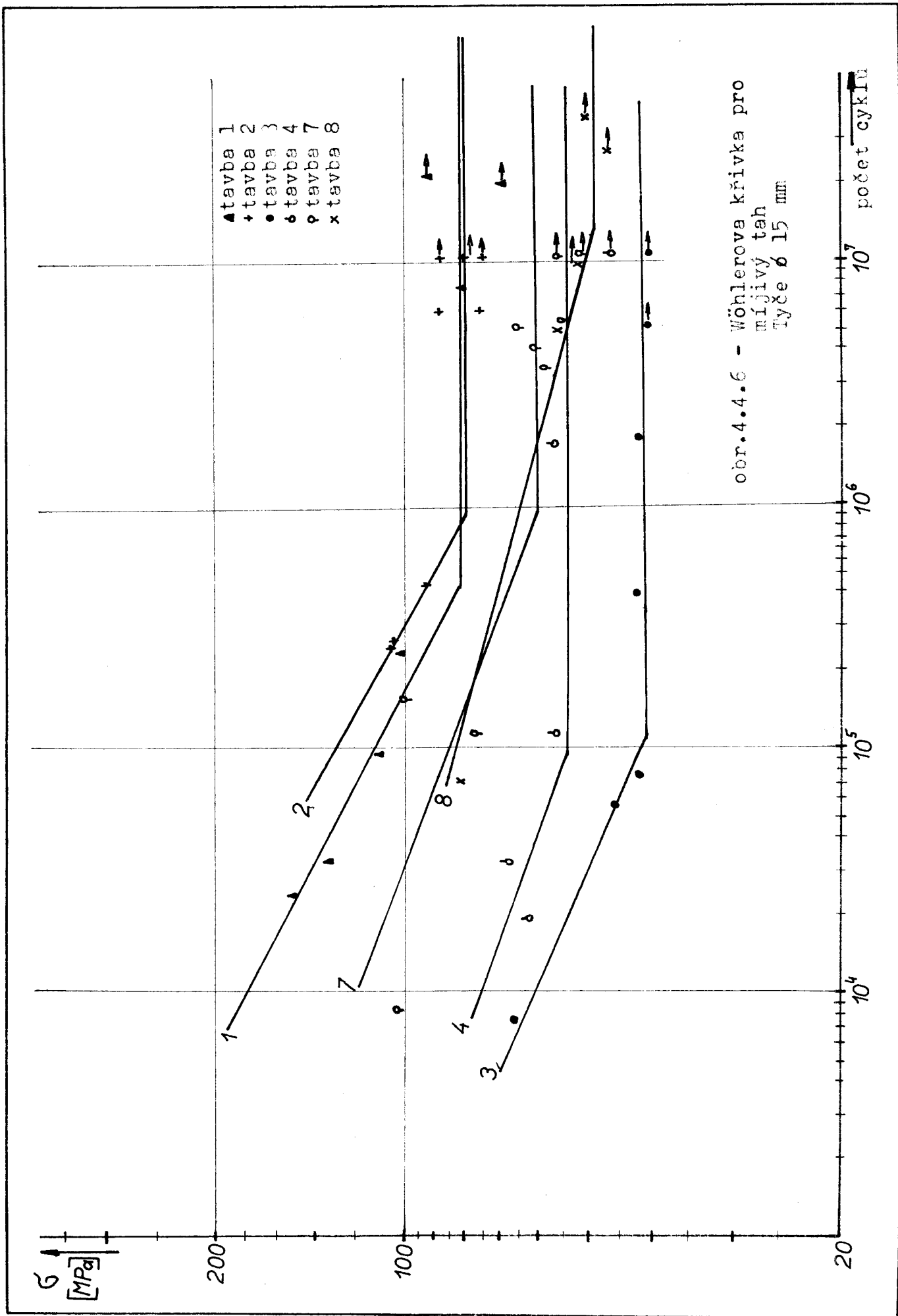
počet cyklů





obr.4.4.4 - Wöhlerova křivka pro plochý ohyb Tyše obrobené 11.200/11.10





Křivky únevné pevnosti představují grafické vyjádření rovnice (3.3.1). Z W-křivek je patrné, že nejvyšších hodnot σ_c dosahují tavby 1 a 8, naproti tomu hodnot nejnižších dosahují tavby 3 a 7. U tavby 7 je pravděpodobně určitá odchylka od ostatních taveb způsobena přítomností 3 % Al v litině. Nízké hodnoty tavby 3 jak pro W-křivky tak pro závislost $\lg \sigma - \lg \epsilon$ jsou způsobeny odlišností výrobního postupu, kdy na rozdíl od ostatních taveb byly tavby 3 a 7 získány z indukční pece, navíc však tavba 3 nebyla oproti tavbě 7 očkovaná.

4.5 Vyhodnocení závislosti modulu pružnosti na napětí

Jak bylo v kapitole 3.1 této práce uvedeno, existují různá grafická vyjádření závislosti modulu pružnosti na napětí. Dávají však pouze přibližný obraz zmíněné závislosti. V této práci jsem se pokusil tento vztah zachytit přesněji a vyslovit případné z toho vyplývající závislosti.

Vycházel jsem z tahových diagramů tyčí ϕ 18 mm a tyčí plochých o průřezu 3 x 10mm ; 6 x 10mm a 6 x 10mm neobrob. Závislost napětí na deformaci jsem graficky zderivoval a tím získal závislost modulu pružnosti na napětí. Postup při grafickém derivování je patrný z obr.4.5.1

Nejprve bylo nutno připravit si osy s pólem P a přímkou p o předem vypočtené směrnici. Vzdálenost pólu P od průsečíku os O byla vypočtena ze zjištěné hodnoty zatěžovací síly F a měřítka deformace, které bylo pro všechny tahové zkoušky rovno 250 : 1. Síla F se pohybovala od 15 000 do 100 000 MPa. Příklad výpočtu je pro sílu F=20 000 MPa. Směrnice přímky p pro tento případ byla vypočtena tímto způsobem :

Pro $E = 2 \cdot 10^5$ MPa byla zatěžující síla $F = 16 000$ MPa průřez tyče $6 \cdot 10 = 60$ mm. Odtud

$$\sigma_E = \frac{F}{S} = 266,7 \text{ MPa}$$

Tím byl získán bod 2 a odtud i směrnice přímky p .
Poloha pólu P je vypočtena ze vztahu

$$\xi = \frac{\sigma_E}{E} = \frac{266,7}{2 \cdot 10^5} = 0,00133 \quad (4.5.2)$$

Ve vzdálenosti 25 mm je podle měřítka 250 : 1
 $\Delta l = 0,1$; ve vzdálenosti 75 mm pak je $\Delta l = 0,3$; odtud

$$\xi = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0,3}{30} = 0,01 \quad (4.5.3)$$

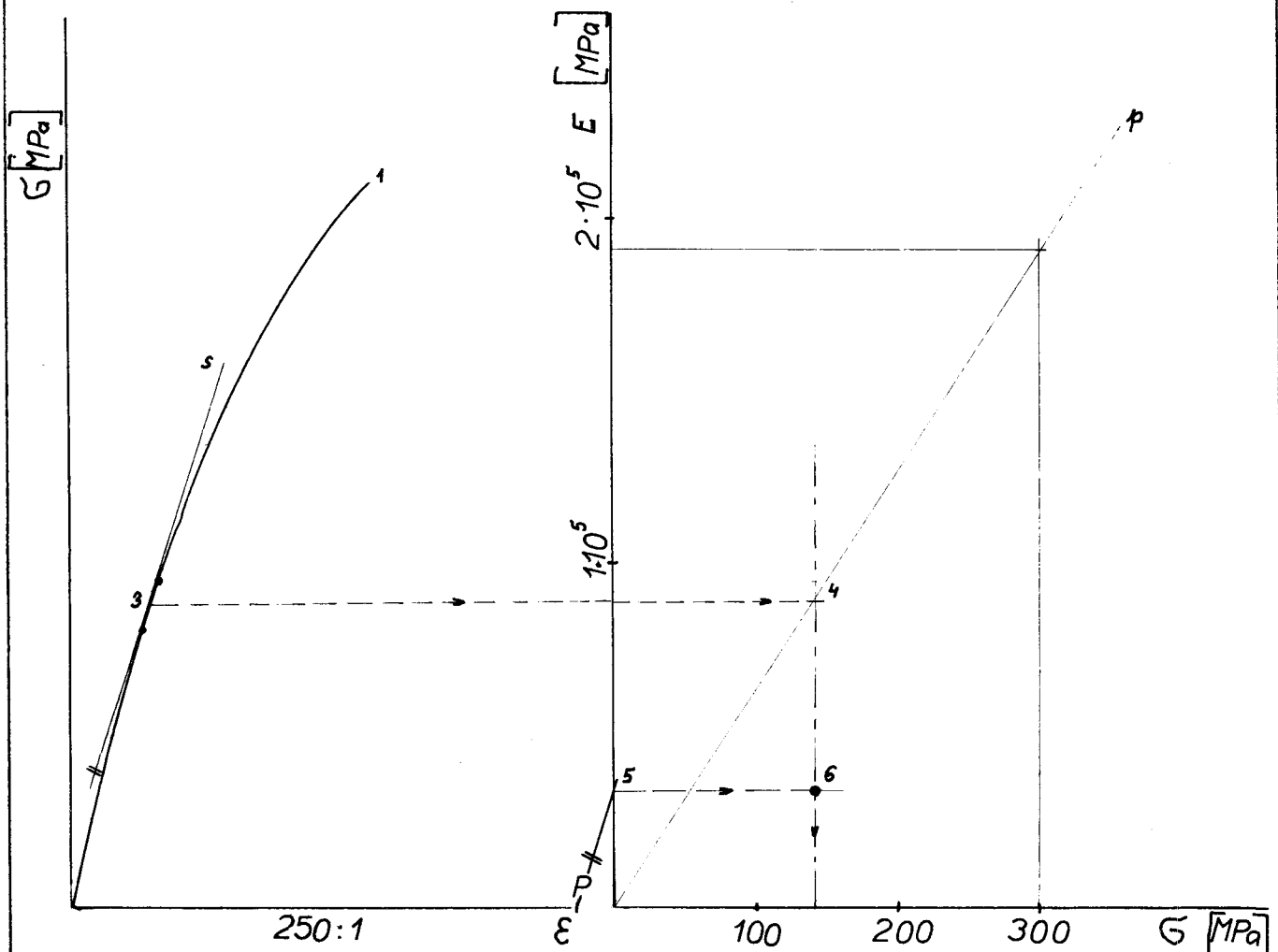
$$\xi = \frac{\sigma_E}{2 \cdot 10^5} = 0,00133 \quad (4.5.2)$$

$$\frac{75 \cdot 0,00133}{0,01} = \underline{10 \text{ mm}} \quad (4.5.4)$$

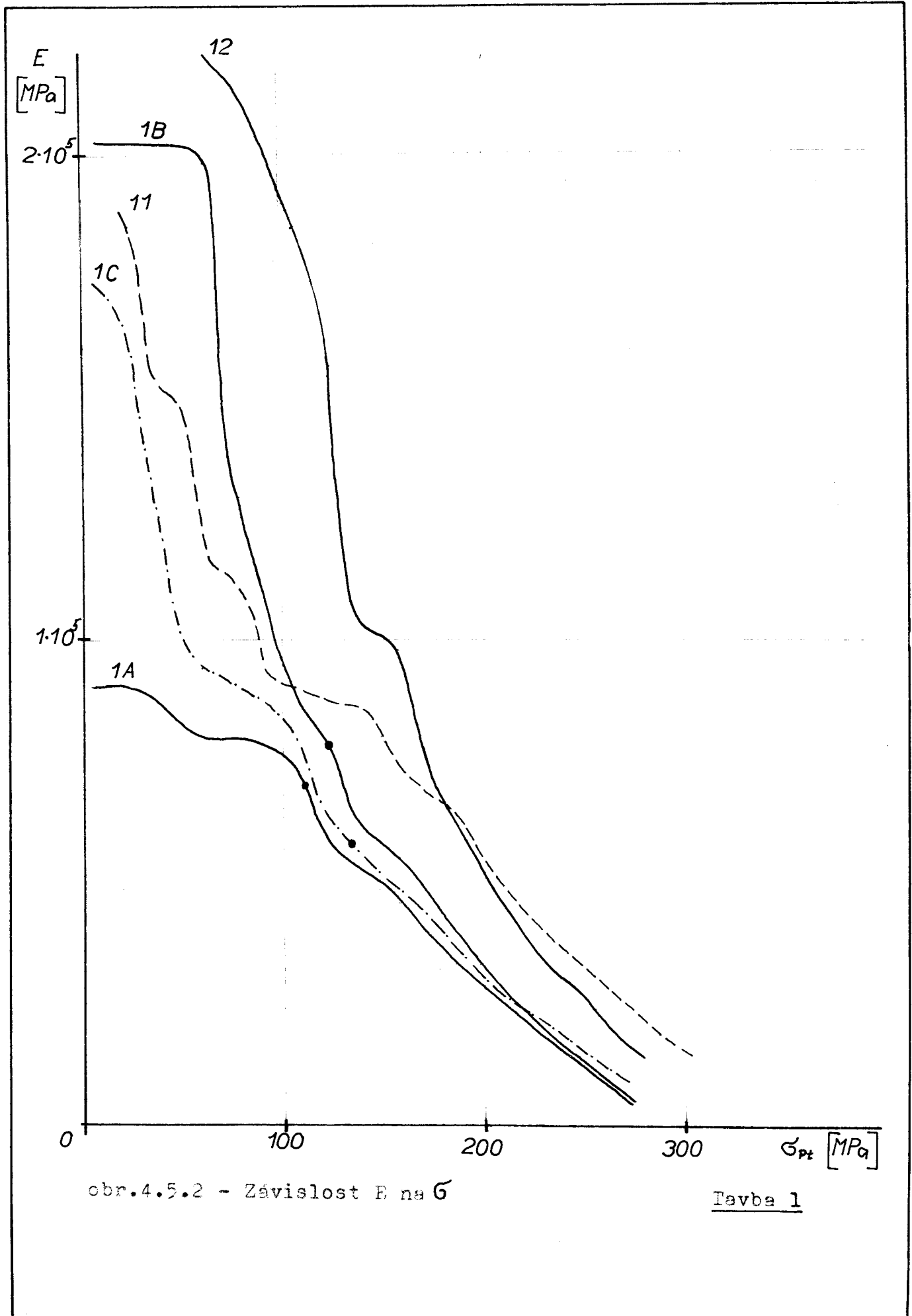
Při derivaci (grafické) by se měly k dané křivce v každém jejím bodě sestrojiti tečny. Protože však jejich konstrukce je značně obtížná a její provedení může přinést i chyby, byla zvolena metoda sečen, která v daném intervalu podle našeho názoru s dostatečnou přesností nahrazuje tečny.

Křivka byla tedy rozdělena na n dílů, ve dvou sousedních bodech ohraničujících každý úsek byla sestrojena sečna. V polovině tohoto intervalu (bod 3) je vedena rovnoběžka s osou σ , která protne přímku p v bodě 4. V tom je pak sestrojena kolmice k ose σ , na které bude ležet daný bod. V bodě P je vedena rovnoběžka se sečnou, která protne osu E v bodě 5. Průsečík přímky, vedené bodem 5 rovnoběžně s osou σ s kolmicí vedenou bodem 4 je pak hledaný bod derivace závislosti E na σ . (6)

Tímto postupem byly získány všechny body grafické derivace a jejich spojením pak závislost E na σ . Takto získané křivky jsou na obrázcích 4.5.2 - 4.5.10. Pro snadnější odvození vyplývajících závislostí a pro větší přehled jsou grafické derivace uspořádány jak pro jednotlivé tavby všech druhů tyčí, tak pro jednotlivý druh tyče všechny tavby. U tyčí $\phi 18$ byly do křivek zaneseny ještě meze mikroplastických deformací.

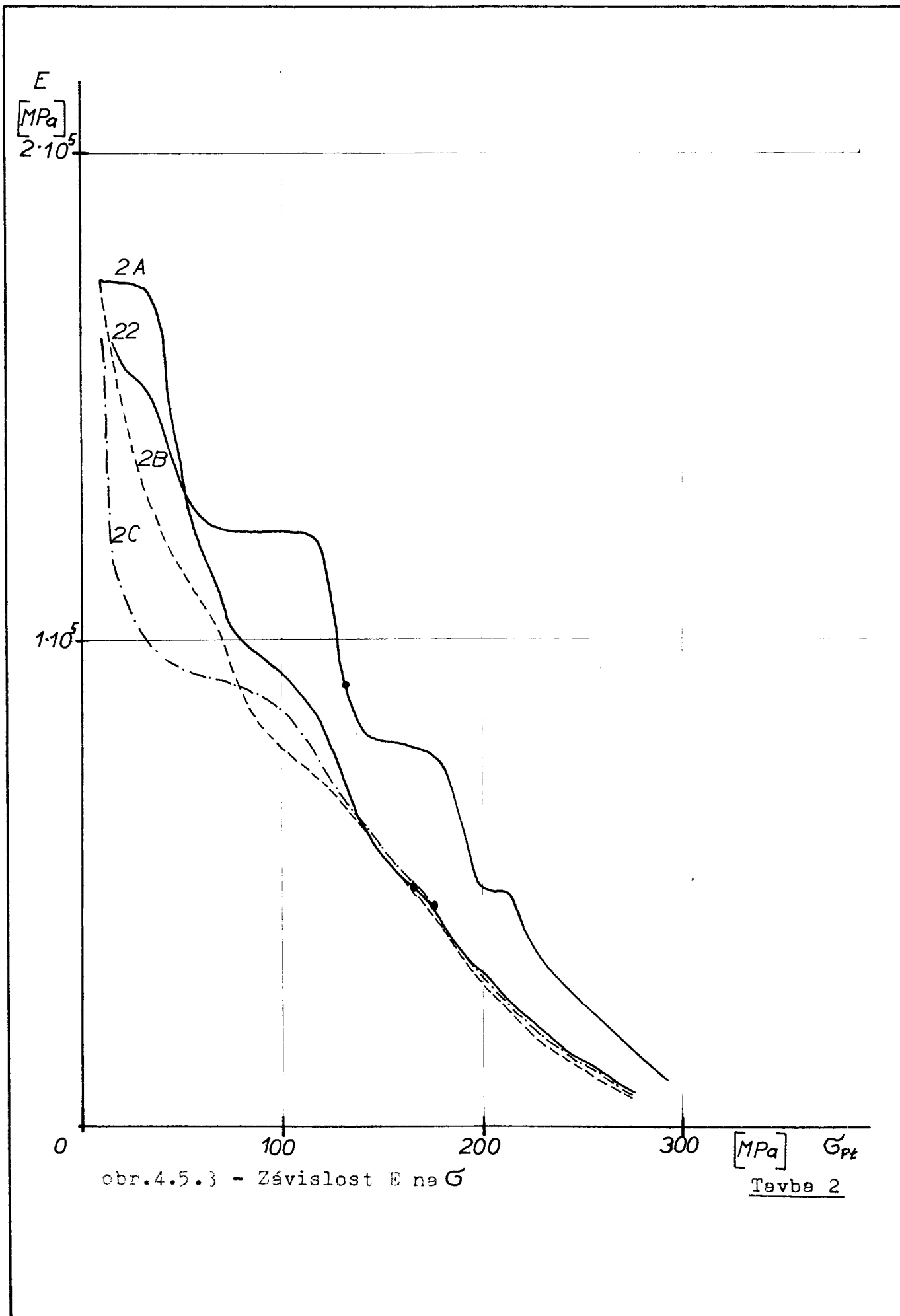


obr.4.5.1 - Postup při sestavení grafické derivace



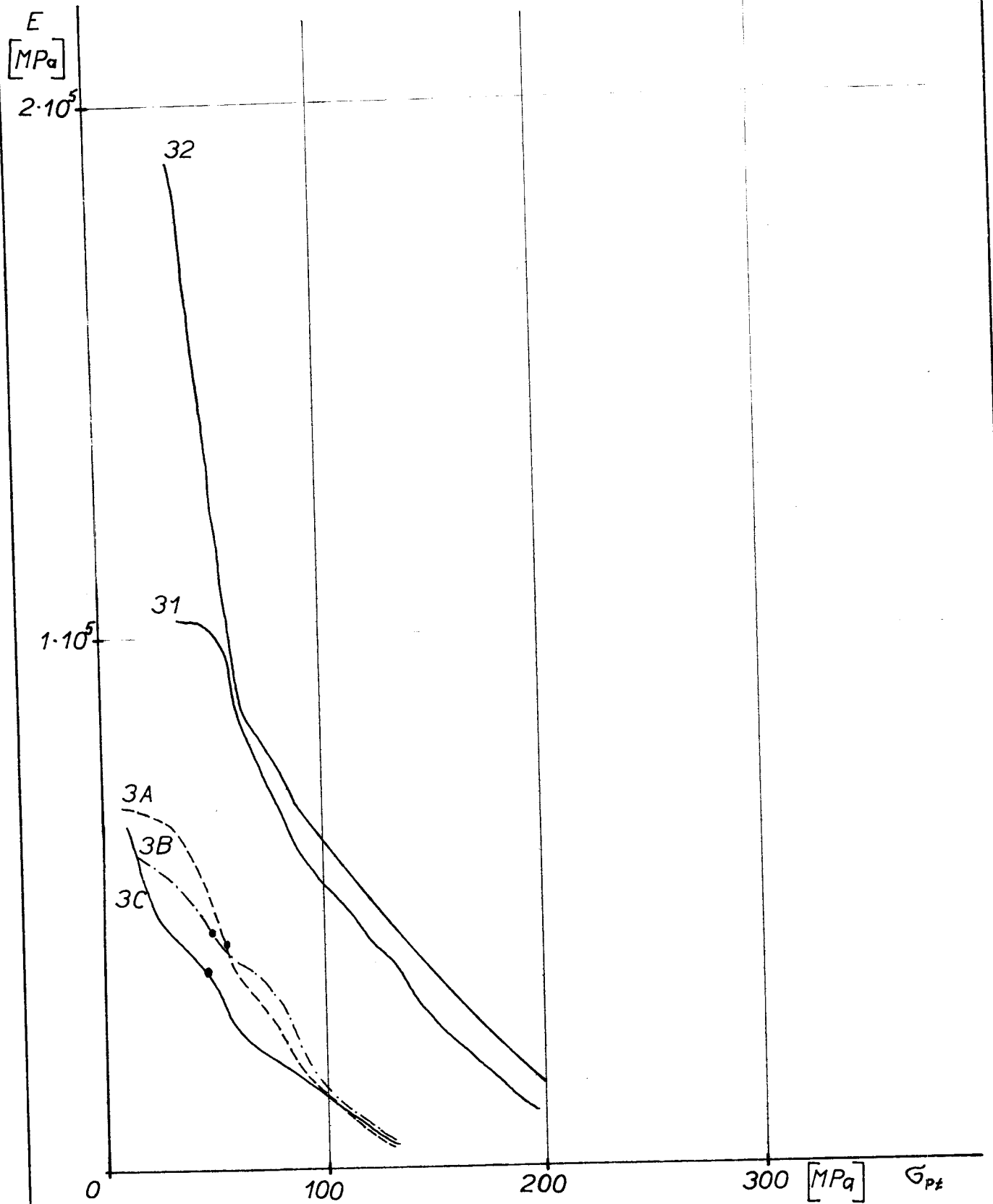
obr.4.5.2 - Závislost E na σ

Tavba 1



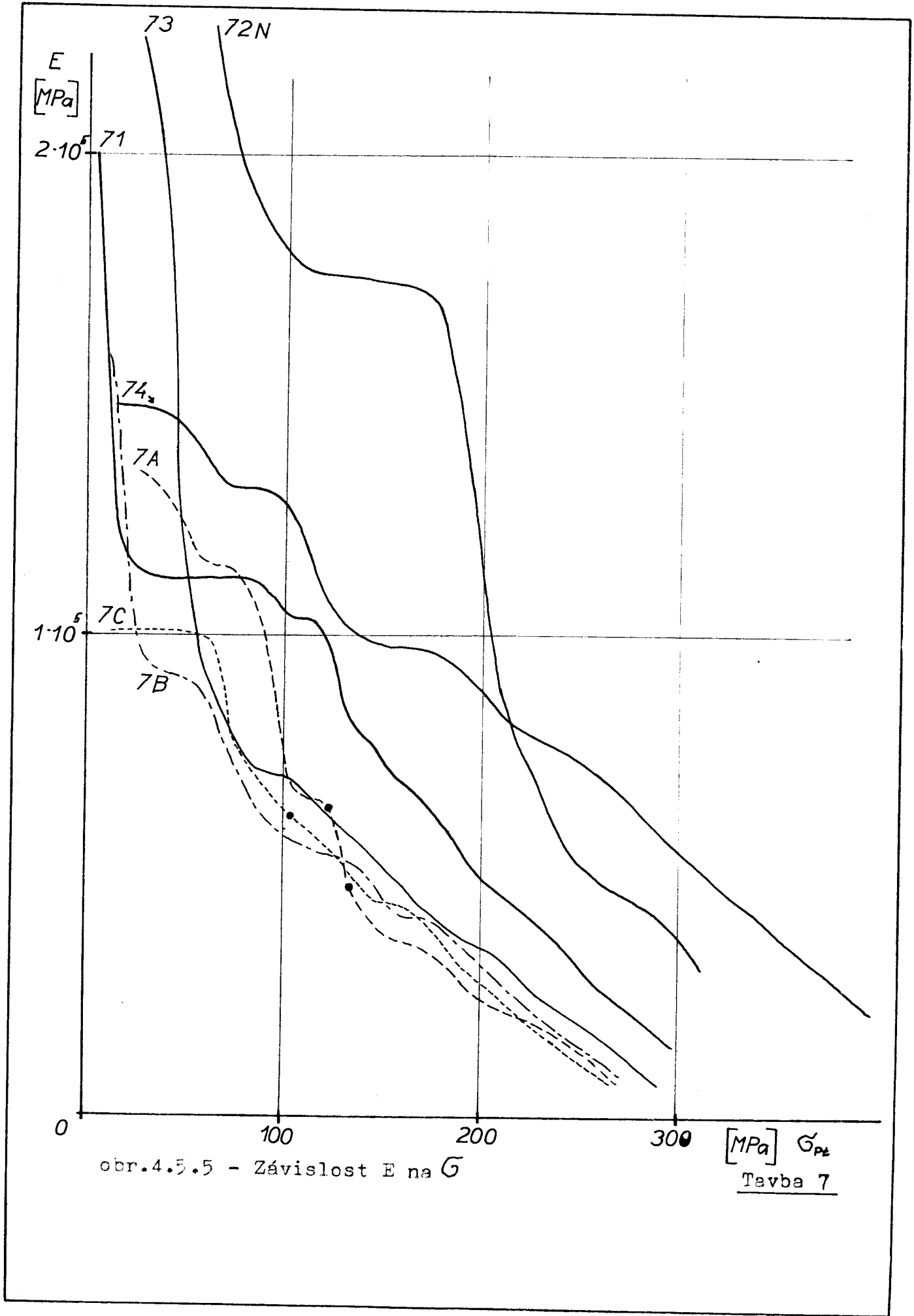
obr.4.5.3 - Závislost E na σ

Tavba 2



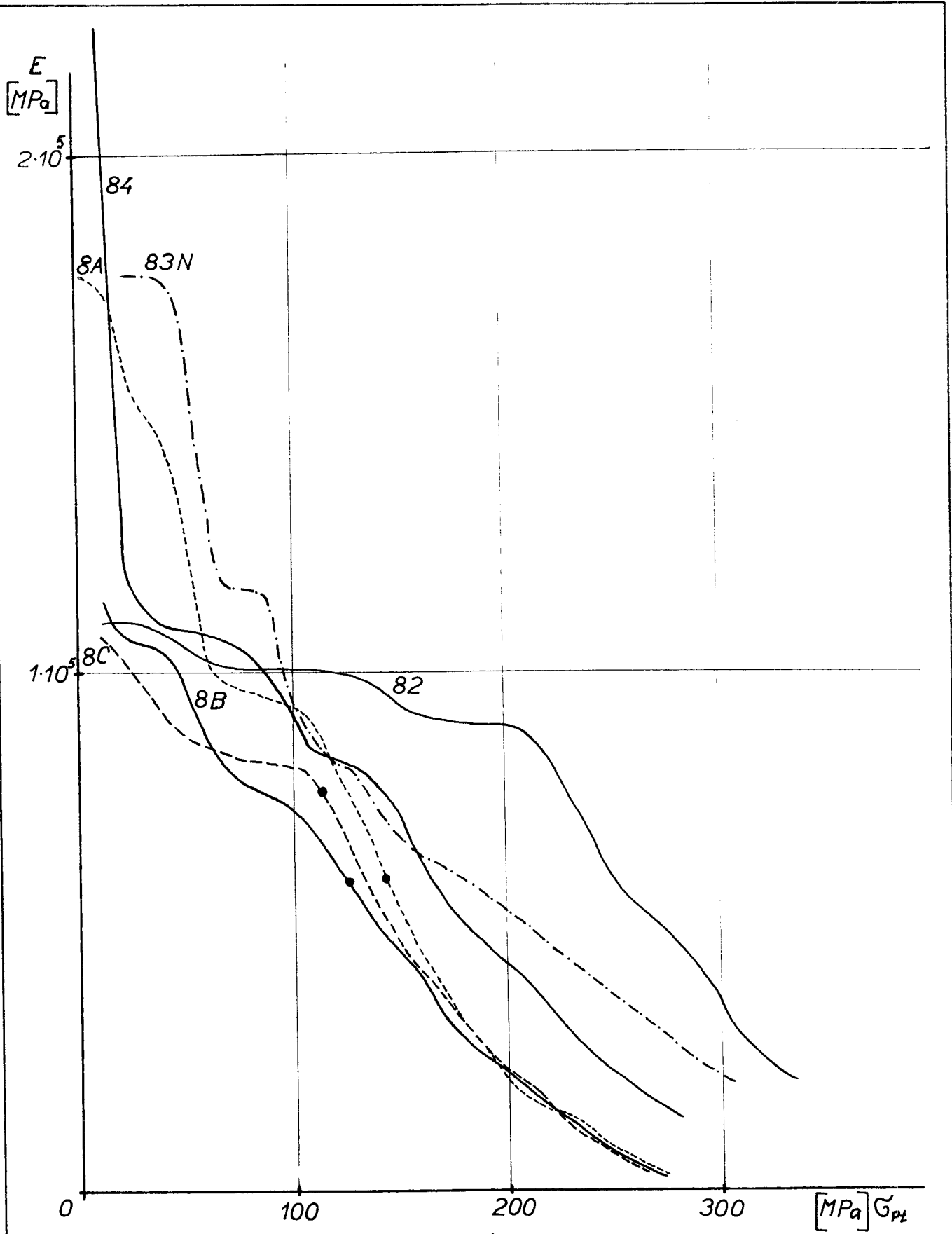
obr.4.5.4 - Závislost E na σ

Tavba 3



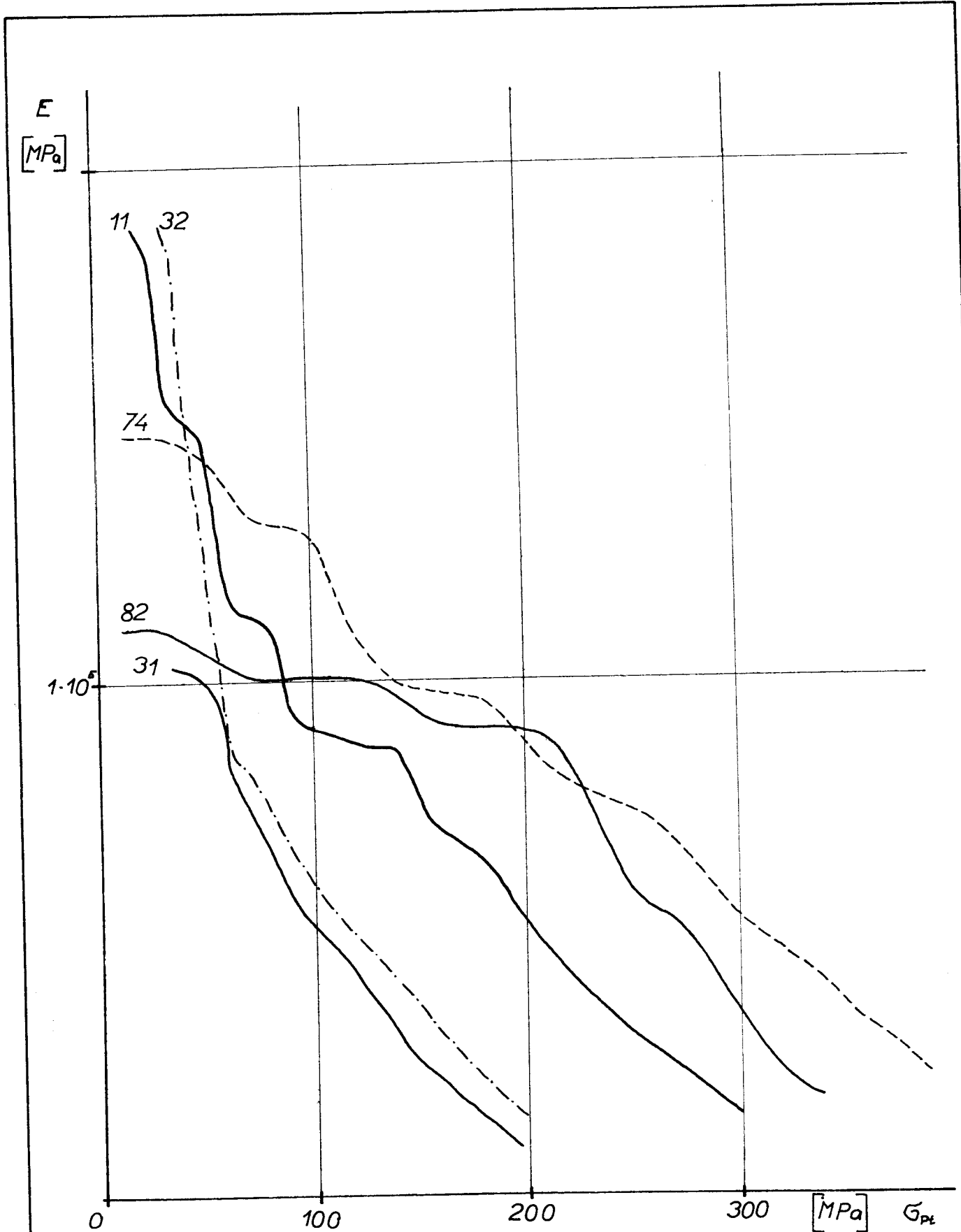
obr.4.5.5 - Závislost E na G

[MPa] G_{PE}
Tavba 7

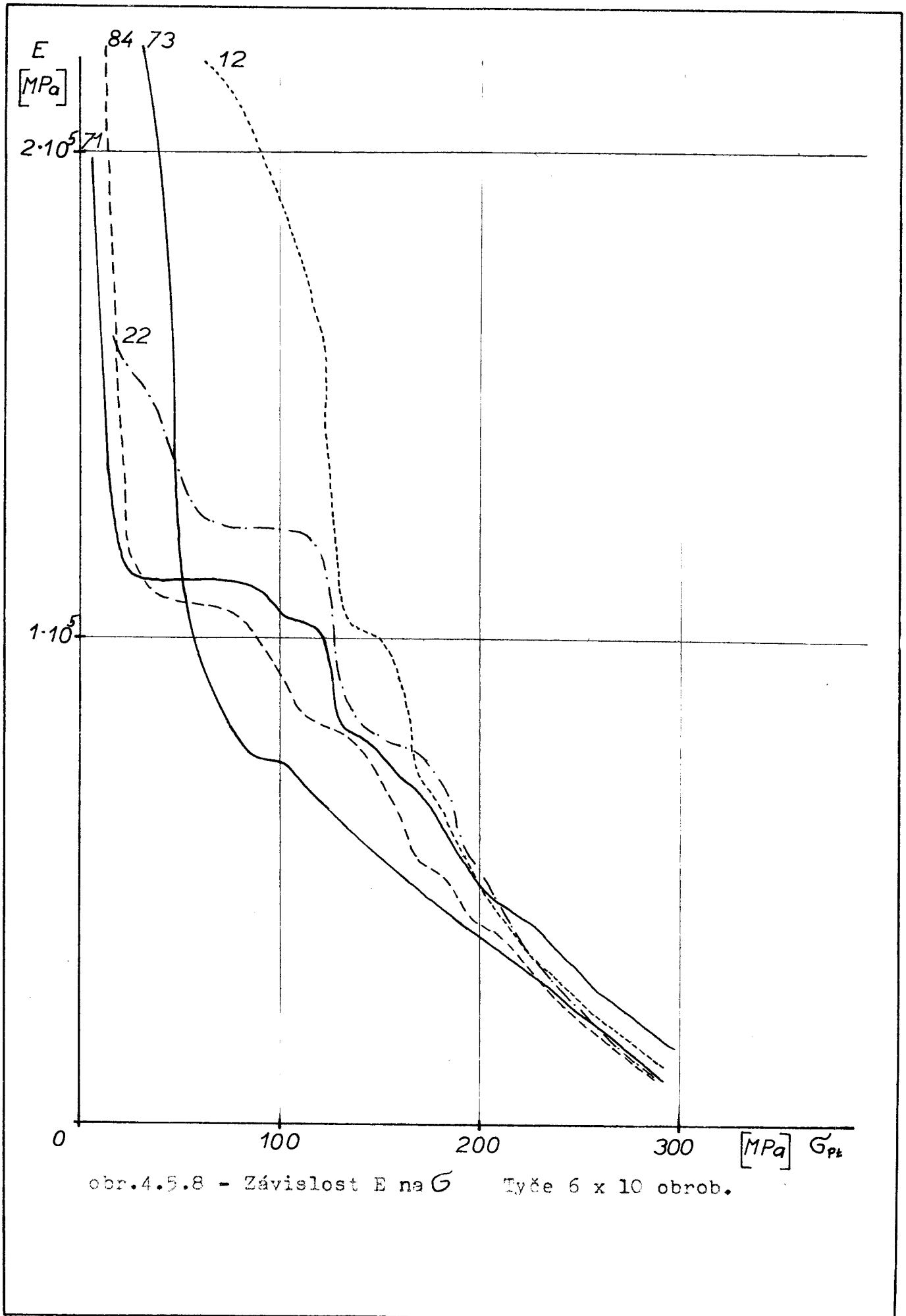


obr.4.5.6 - Závislost E na G

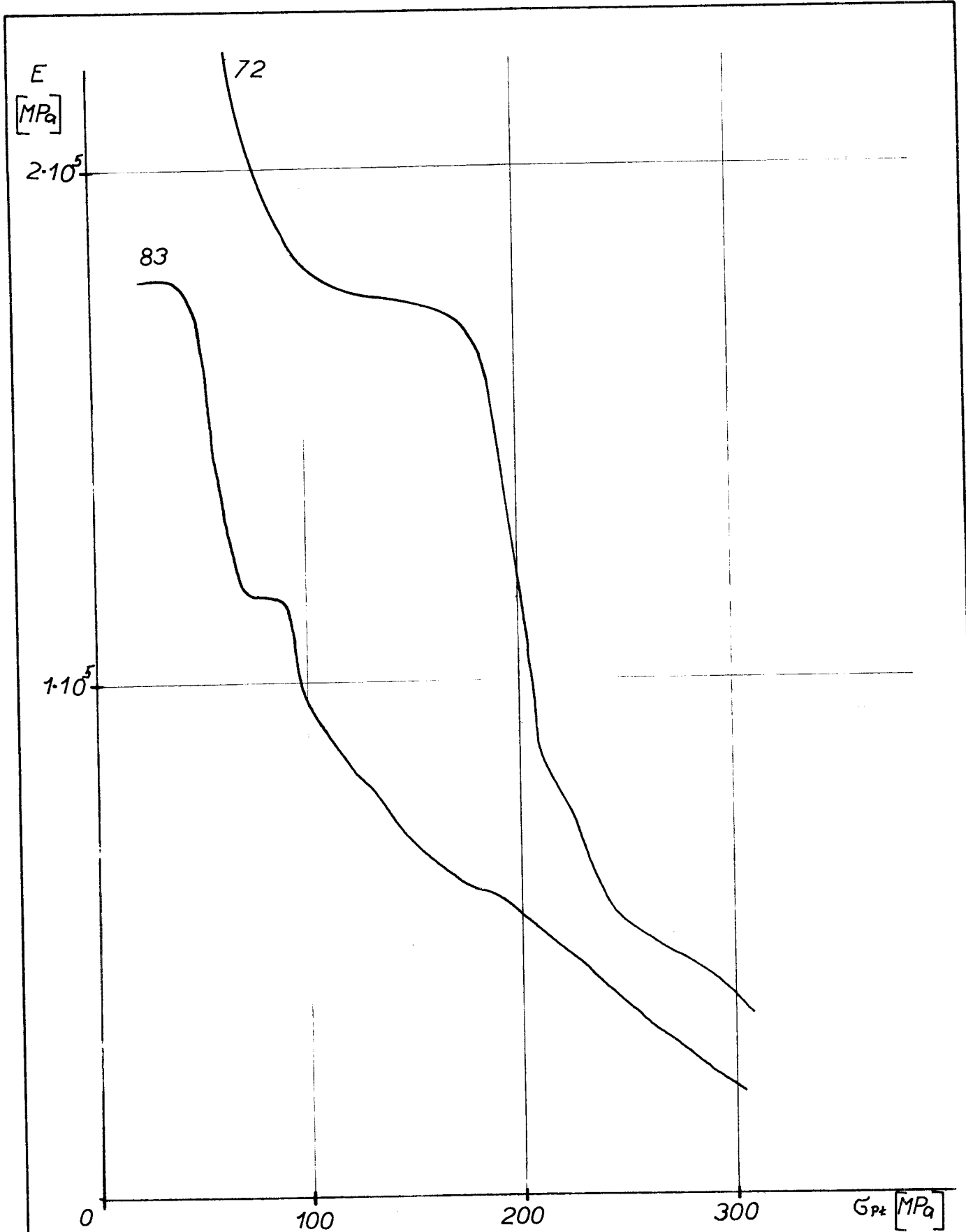
Tavba 8



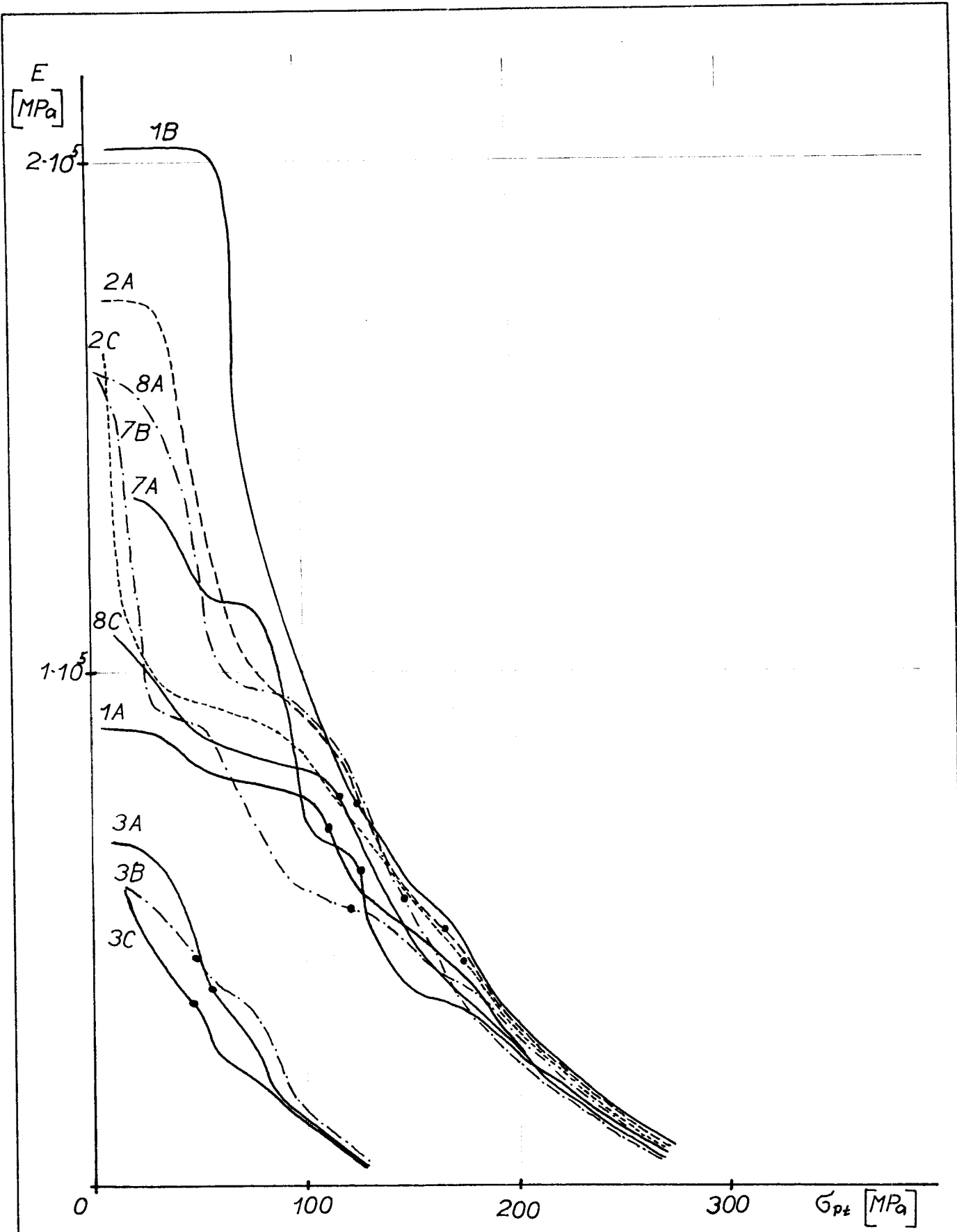
cbr.4.5.7 - Závislost E na G_{pl} Tyče 3 x 10 mm



obr.4.5.8 - Závislost E na G Tyče 6×10 obrob.



obr.4.5.9 - Závislost E na σ Tyče 6×10 neobrob.



obr.4.5.10 - Závislost E na σ Tyče ϕ 18 mm

5. Diskuse výsledků

Vyjdeme-li ze zjednodušené představy, podle níž je struktura šedé litiny tvořena kovovou maticí, v níž jsou uloženy lupínky grafitu a přihlédneme-li ke značně rozdílné pevnosti kovové matrice na straně jedné a grafitu na straně druhé, vyplývá závěr, že síla, působící na litinové tělesa je přenášena pouze kovovou maticí. Proto je také užitečný nosný průřez menší než průřez vypočtený a skutečné napětí je vyšší než napětí jmenovité. Dalším důsledkem přítomnosti grafitu v kovové maticí je jeho vrubový účinek, který se projevuje vznikem lokálních koncentrací napětí v okolí grafitových lupínek a z toho vyplývající nehomogenní rozložení napětí v kovové maticí. Proto také dochází i při zatížení jednoosým tahem ke vzniku prostorového tvaru napjatosti.

Pro kvantitativní vyjádření vlivu lupínkového grafitu na snížení nosného průřezu litinového tělesa a vznik nehomogenního tvaru napětí při osovém zatížení v oblasti pružné deformace se doporučuje používat tzv. součinitele zúžení, který je dán poměrem modulu pružnosti oceli E_s k modulu pružnosti uvažované litiny E_g , tj.

$$e_d = \frac{E_s}{E_g} \quad (5.1)$$

Předpokládáme-li, že modul pružnosti oceli je nezávislý na její struktuře nebo na malém obsahu cizích prvků a jeho hodnota je asi $2 \cdot 10^5$ MPa, pohybují se hodnoty součinitele zúžení v intervalu 1,5-2,5.

Protože oblast pružných deformací šedých litin není ještě zcela jednoznačně vysvětlena, je přesné stanovení meze pružné deformace je poměrně obtížné a naráží na dva velké problémy, kde první je fakt, že měření velmi malých deformací řádu asi 10^{-5} - 10^{-7} mm je velmi náročné a druhý problém je nehomogenní stav napětí kovové matrice.

Naše výsledky lze zhruba shrnout do několika bodů:

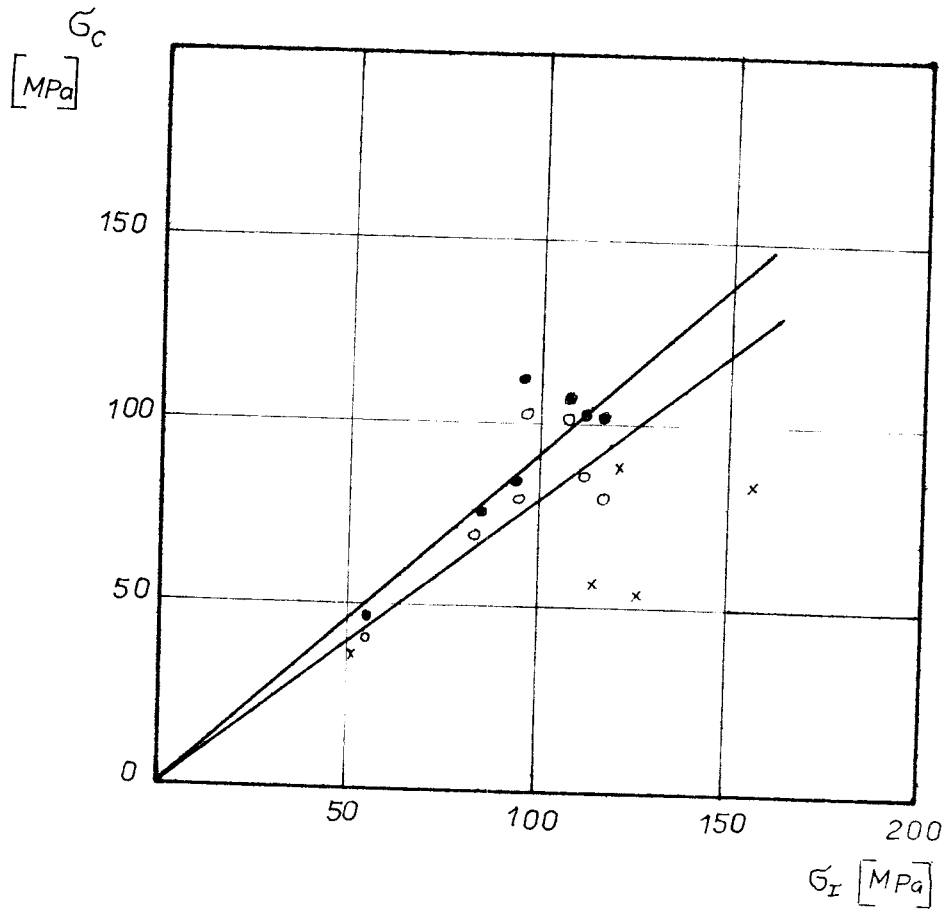
Při statickém zatěžování šedé litiny existují tři rozdílné oblasti deformace. První oblast je oblastí mikroplastických deformací, druhá oblast oproti oblasti třetí je charakterizována podstatně větší intenzitou deformačního zpevnění.

Napětí na mezi mikroplastických deformací je podle /3/ poměrně dobře shodné s mezí únavy při míjivém zatěžování tahem. Tuto souvislost, zjišťovanou u vzorků ze šesti taveb litin s víceméně extrapolovanými hodnotami mezných napětí pro 10^7 a 10^6 cyklů se nám při hodnocení výsledků nepodařilo stejným způsobem prokázat, naopak zjistili jsme významnější jednostranné odchylky. Tyto odchylky pramení bezpochyby z rozdílného hodnocení únavových vlastností v tom smyslu, že při našich měřeních jsme zásadně vyhodnocovali mez únavy jako nejvyšší napětí, které vydržely zkušební tyče bez porušení alespoň při 10^7 cyklech, tj. na počátku oblasti dlouhodobé pevnosti./viz obr.5.1/

Mechanické vlastnosti šedé litiny jsou podstatně ovlivněny tvarem a rozložením lupínek grafitu, jak vyplývá ze získané struktury a ze zjištěných hodnot při mechanických zkouškách. Je to patrné zejména u tavy 8, kde vyhodnocení grafitu

je IA7 a v tabuli 3, kde je grafit hodnocen I-IV C5. Tomu odpovídají také výsledné hodnoty zkoušek z tabulky II, kde tabulka 8 dosahuje nejlepších a nejvyšších hodnot, ať už jde o pevnost nebo o únavu. Oproti tomu tabulka 3 je charakterizována velmi malými hodnotami nejen meze pevnosti, ale také meze únavy. Tomuto odpovídá i mez mikriplastických deformací σ_I , kde její hodnota u tabulky 8 je nejlepší a dosahuje 57,5 % σ_{Pt} , oproti tabuli 3, kde dosahuje hodnoty pouhých 37,4%. Zajímavé však je, že hodnota meze pružných deformací σ_{II} nedosahuje vysokých hodnot / pouze 74,5% σ_{Pt} / a tudíž interval mezi σ_I a σ_{II} je poměrně malý.

Naopak u materiálu, který se projevil z hlediska mechanických a únavových vlastností nejhorší, dosahuje hodnota σ_{II} obdobných srovnatelných hodnot / 72,3 % σ_{Pt} /, avšak interval mezi σ_I a σ_{II} je poměrně větší a z absolutních hodnot σ_I , σ_{II} je patrné, že došlo k poměrně významnému snížení právě meze mikroplastických deformací σ_I . Z toho se dá usuzovat, že mez mikroplastických deformací, které ve své fyzikální podstatě je "mezí pružnosti" šedé litiny, bude mít právě na základě tohoto fyzikálního významu určitý vztah k mezi únavy σ_c . Bude však nutný větší počet srovnatelných měření, aby bylo možno v zásadě správné závěry Drápalovy upřesnit.



obr.5.1 - Vztah mezi σ_I a σ_c .

- o - $N=10^7$ cyklů dle Drápala
- - $N=10^6$ cyklů dle Drápala
- x - němi naměřené hodnoty

6. Závěr

Ze všech provedených měření a z jejich vyhodnocení se ukazuje, že takto získané výsledky jsou v dobrém souladu se stávajícími teoretickými znalostmi. Podle srovnávacích zkoušek statických a dynamických vlastností šedých litin se ukazuje mimořádný význam strukturálních poměrů, zejména tvaru, velikosti a rozložení grafitu na výsledné mechanické vlastnosti a tedy i možné tendence zvětšování užitečných vlastností litin pro výrobu dynamicky namáhaných odlitků, zejména cestou cílevědomého ovládnutí primární krystalizace.

Tato cesta se jeví jako nejschůdnější k cíli, aby bylo zabráněno buď zvyšujícímu se počtu lomů litinových odlitků při zvětšování výkonu nebo k zesílení tloušťky stěny a tím i neekonomickému a nežádoucímu zvýšení váhy motoru.

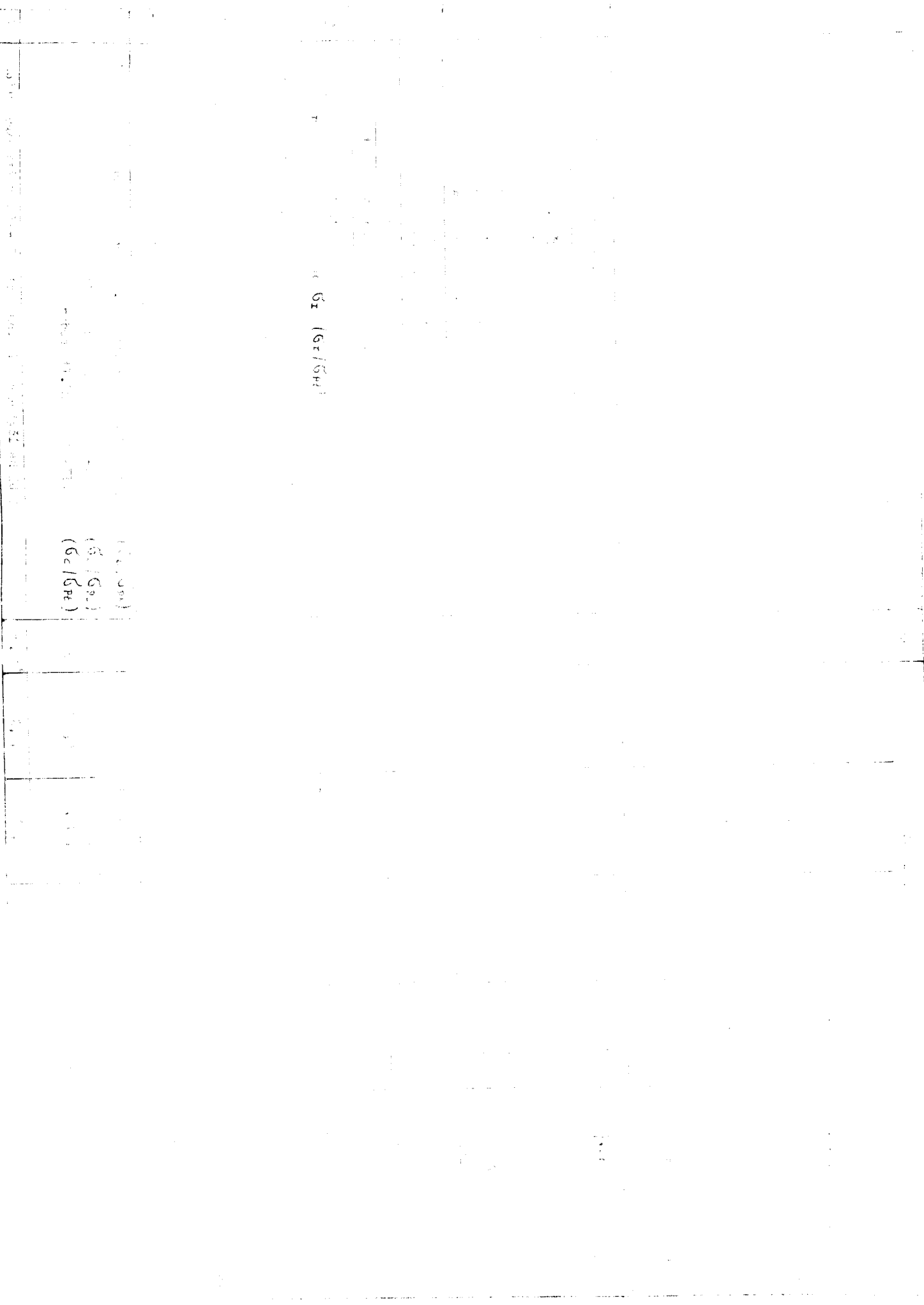
Závislost E na σ , získaná derivací závislosti $\epsilon - \sigma$ přináší nový poznatek o chování modulu pružnosti v tahu v závislosti na napětí a ukazuje, že při růstu napětí se před dosažením meze mikroplastických deformací σ_I objeví na grafu závislosti $E - \sigma$ krátký interval, při kterém při zvětšujícím se zatížení modul pružnosti zůstává konstantní. Po překročení tohoto intervalu dojde k dosažení meze mikroplastických deformací, k jejímu překročení a tedy i ke vzniku prvních měřitelných deformací. Tento fakt je nutno ještě podrobněji rozebrat, ověřit na větším počtu zkušebních vzorků a zjistit, jak dalece obecnou platnost má tento zjištěný poznatek. Tato práce je k tomuto vyšetření pouze skromným úvodem.

Seznam použité literatury

- 1 - Úvodní zpráva k úkolu OC 551 M, LIAZ Liberec 1976
- 2 - Pluhař, J. Koritta J. : Strojírenské materiály.
2. vyd. SNTL Praha 1977
- 3 - Drápal, S.: Vliv přetížení na únavovou pevnost těles
ze šedé litiny Výzkumná zpráva Praha SVÚM 1973
- 4 - Dorazil, E : Tvěrná litina o vysoké pevnosti Výzkumná
zpráva Brno, VUT- katedra technologie a nauky o mate-
riálu
- 5 - Skala, P: Diplomová práce 1975

Závěrem této práce bych chtěl poděkovat svým konzultantům, ing. Jaroslavu Exnerovi CSc a ing. Františku Grohovi za jejich odborné rady a pomoc při vypracování této diplomové práce.

V Liberci 24.5.1978



Gr (Gr/SH)

(Gr/SH)
(Gr/SH)
(Gr/SH)

...
...
...

...
...
...